

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie (bakalářské studium)

Studijní obor: Geografie a kartografie



Marek Čelonk

**VYUŽITÍ GEOINFORMAČNÍCH METOD PRO DOKUMENTACI
PALEONTOLOGICKÝCH OSTATKŮ**

POSSIBLY GIS METHODS FOR DOCUMENTATION OF PALEONTOLOGICAL RELICS

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Eva Štefanová, Ph.D.

Praha, 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, dne 31. července 2017

Marek Čelonk

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucí své práce Ing. Evě Štefanové, Ph. D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval RNDr. Martinu Mazuchovi, Ph. D., který mi umožnil přístup do Chlupáčova muzea historie Země a zapůjčení předmětu ze sbírky. V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině, která mi byla oporou při zpracování bakalářské práce i v průběhu celého studia.

Využití geoinformačních metod pro dokumentaci paleontologických ostatků

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím geoinformačních metod pro tvorbu digitálního 3D modelu. Práce je vytvořena ve spolupráci s Chlupáčovo muzeem historie Země, které zapůjčilo paleontologický artefakt pro zpracování. Teoretická část se věnuje problematice laserového skenování a průsekové fotogrammetrie. Obě metody jsou v praktické části použity pro vlastní sběr dat a následnou tvorbou 3D modelů. Zpracování dat bylo provedeno převážně v softwarech Trimble RealWorks, MeshLab a Agisoft PhotoScan. Dalším výstupem je HTML stránka, která umožňuje vizualizaci v prostředí Internetu.

klíčová slova

3D model, laserové skenování, průseková fotogrammetrie, bodové mračno

Possibly GIS methods for documentation of paleontological relics

Abstract

The bachelor thesis is focused on use of geoinformatic methods for creation of 3D model. The thesis is produced in cooperation with the Chlupáč's Museum of Earth History, which lent a paleontological artifact for processing. The theoretical part deals with laser scanning and close-range photogrammetry. Both methods are used in the practical part for own data collection and subsequent creation of 3D model. Data processing was mostly done in Trimble RealWorks, MeshLab and Agisoft PhotoScan. Another output is the HTML page that allows visualization in the Internet environment.

key words

3D model, laser scanning, close-range photogrammetry, point cloud

Obsah

Seznam obrázků	6
Seznam tabulek.....	7
Seznam použitých zkratk.....	8
1 Úvod	9
2 Teoretická část	10
2.1 Vícerozměrný prostor	10
2.2 Laserové skenování	10
2.2.1 Princip laserového skenování.....	11
2.2.2 Mračno bodů	11
2.2.3 Dělení laserových skenerů.....	12
2.3 Fotogrammetrie	15
2.3.1 Dělení fotogrammetrie	16
2.4 Paleontologický artefakt	20
3 Sběr dat	22
3.1 Neměřická kamera	22
3.2 Pořízení snímků	22
3.3 Laserový skener	24
3.4 Skenování modelu	24
4 Tvorba modelu	27
4.1 Použité programy	27
4.2 Model z dat laserového skenování.....	29
4.2.1 Registrace	29
4.2.2 Ořez bodového mračna.....	32
4.2.3 Export a Import dat.....	34
4.2.4 Vytvoření modelu v MeshLab.....	35
4.2.5 Vytvoření textury	39
4.3 Tvorba modelu ze snímků	40
4.3.1 Uspořádání snímků	41
4.3.2 Vytvoření modelu.....	42
4.3.3 Nastavení měřítka.....	46
4.4 Hodnocení přesnosti	47
5 Vizualizace v prostředí Internetu	49
6 Diskuze	49
7 Závěr	51
8 Literatura a zdroje	53
Seznam příloh	55

Seznam obrázků

Obr. č. 1: Skenování triangulačním skenerem	14
Obr. č. 2: Skenování pomocí doby letu	14
Obr. č. 3: Normální případ stereofotogrammetrie	18
Obr. č. 4: Schéma průsekové fotogrammetrie	18
Obr. č. 5: Schéma metody structure from motion	19
Obr. č. 6: Postupy zpracování ve vývoji v čase	20
Obr. č. 7: Model lebky	21
Obr. č. 8: Megatherium americanum	21
Obr. č. 9: Rozmístění snímků kolem modelu	23
Obr. č. 10: Laserový skener Trimble TX5	24
Obr. č. 11: Rozmístění stanovišek a spojovacích cílů	25
Obr. č. 12: Režim měření expozice	26
Obr. č. 13: Bodové mračno se spojovacími body	27
Obr. č. 14: Výsledný TZF snímek z jednoho stanoviška	29
Obr. č. 15: Sample scan pro data získaná z jednoho stanoviška	30
Obr. č. 16: Sample scan pro všechna získaná data ze všech stanovišek	30
Obr. č. 17: Výběr spojovacích bodů z celého snímku	31
Obr. č. 18: Úprava výběru v podokně Fitting	31
Obr. č. 19: Registrované bodové mračno	31
Obr. č. 20: Funkce Limit Box Extraction	32
Obr. č. 21: Úprava scény	32
Obr. č. 22: Vykreslování bodového mračna	33
Obr. č. 23: Model lebky vytvořen v Trimble RealWorks	34
Obr. č. 24: Nastavení struktury importovaného souboru	35
Obr. č. 25: Načtené bodové mračno	35
Obr. č. 26: Normály mračna bodů	35
Obr. č. 27: Algoritmus Ball Pivoting	36
obr. č. 28: Model vytvořený algoritmem Ball Pivoting	37
Obr. č. 29: Algoritmus Poissonovy rekonstrukce	37
Obr. č. 30: Model vytvořený Poissonovo rekonstrukcí	38
Obr. č. 31: Quality Mapper pro vytvořený model	39
Obr. č. 32: Model s vlastní texturou	40
Obr. č. 33: Porovnání vytvořených modelů	41
Obr. č. 34: Autokalibrace kamery	42
Obr. č. 35: Bodové mračno a použití funkce Set Bounding Box	42
Obr. č. 36: Husté bodové mračno	43

Obr. č. 37: Odmazání částí nespojených s modelem	44
Obr. č. 38: Výsledný model vytvořený ze snímků	46
Obr. č. 39: Nastavení měřítka modelu	46
Obr. č. 40: Histogram rozdílných hodnot.....	48
Obr. č. 41: Rozdíly mezi vytvořenými modely.....	48

Seznam tabulek

Tab. č. 1: Přehled laserových skenerů.....	12
Tab. č. 2: Zaměřené délky	47

Seznam použitých zkratek

3D	Trojdimenzionální
3DS	3D Studio file format
ASC	ASCII file format
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer Aided Design
ČVUT	České Vysoké Učení Technické
DMP	Digitální Model Povrchu
DMR	Digitální Model Reliéfu
DMT	Digitální Model Terénu
EXIF	Exchangeable Image File Format
FLS	Fiber Local Storage
HTML	HyperText Markup Language
JPEG	Joint Photographic Expert Group
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LiDAR	Light Detection and Ranging
MTL	Material Library file
OBJ	Object file format
PLY	Polygon file format
RAM	Random Access Memory
RGB	Red, Green, Blue
RWI	Trimble RealWorks file folder
RWP	Trimble RealWorks project format
SD	Secure Digital
SfM	Structure from Motion
STL	STereoLithography file format
TXT	Text file format
TZF	Trimble RealWorks scan format
VRAM	Video Random Access Memory
VÚGTK	Výzkumný Ústav Geodetický, Topografický a Kartografický

1 Úvod

Tvorba přesných 3D modelů z reálných objektů je v dnešní době využívána v mnoha odvětvích, jako je například archeologie, architektura, geografie, zdravotnictví nebo strojírenství. V současnosti se využívají převážně dvě metody. Metodou s delší historií je průseková fotogrammetrie naopak metoda laserového skenování je poměrně mladá a rychle se rozvíjející. Hlavním aspektem obou metod je bezkontaktní sběr dat.

Práci jsem si vybral, protože mě zaujala možnost praktického vyzkoušení moderní metody laserového skenování a tradiční průsekové fotogrammetrie. Nemalou motivací byla také možnost, že vytvořený model bude využit Chlupáčovo muzeem historie Země, které zapůjčilo model lebky vyhynulého živočicha Megatherium.

Hlavním cílem bakalářské práce je vytvoření digitálního 3D modelu pomocí geoinformačních metod. Konkrétně jde o metody laserového skenování a průsekové fotogrammetrie.

Dílčí cíle práce jsou:

1. Představení principů jednotlivých metod
2. Pořízení vhodných dat (laserová data, snímky) daného objektu pro tvorbu 3D modelu
3. Zpracování dat
4. Tvorba 3D modelu a jeho vizualizace
5. Hodnocení přesnosti výsledných 3D modelů
6. Prezentace výsledků na internetu

Na začátku práce jsou v teoretické části vysvětleny principy a způsoby dělení metody laserového skenování a vědního oboru fotogrammetrie. V praktické části je popsán sběr dat za použití výše zmíněných metod v připravené scéně. Hlavní část praktické části tvoří popis zpracování získaných dat a jednotlivé kroky tvorby modelu ve vybraných softwarech. Následně je popsána vizualizace vytvořeného objektu v prostředí Internetu. Nakonec jsou obě metody porovnány.

2 Teoretická část

Bakalářská práce se zabývá využitím různých metod sběru prostorových dat pro tvorbu a vizualizaci 3D objektu. V této části práce budou popsány principy, výhody a využití právě dvou použitých metod, metody laserového skenování a metody průsekové fotogrammetrie.

2.1 Vícerozměrný prostor

Pokud se hovoří o vícerozměrném prostoru, často se používá zkratka 3D. Toto označení udává, že je známá informace o délce, šířce i výšce objektu. Lze se setkat s prostory 1D, 2D, 2,5D, 3D a 4D. Všechny tyto prostory vysvětluje Kraak, Ormeling (2010) ve spojení s kartografickým prostředím. Pokud je znám pouze 1D prostor, tak prostorová data mohou být od centrálního bodu spojena linií. V případě, že je použit 2D prostor, můžou vzniknout body, linie a polygony se souřadnicemi x a y . Výsledkem je rovinná polohopisná mapa. Při použití 2,5D prostoru dochází k promítnutí 3D reality na 2D plochu. Tento prostor je tedy definován souřadnicemi x , y a atributem s hodnotou souřadnice z . Pravou 3D reprezentací je fyzický nebo digitální model, kterým lze otáčet a nahlížet na něj ze všech stran. Pokud je přidána informace o čase vzniká tzv. 4D prostor.

2.2 Laserové skenování

Slovo LASER je akronymem pro *Light Amplification by means of Stimulated Emission of Radiation*, což se do češtiny překládá jako „zesílení světla s využitím stimulované emise záření.“ Vynález prvního laseru v roce 1960 je připisován doktoru T. H. Maimanovi (Sochor, 1990).

Metoda laserového skenování, též označovaná jako LiDAR (*Light Detection and Ranging*), je v dnešní době již velmi dobře známá a je hojně využívána. Základní úlohou laserového skenování je získání prostorové informace zkoumaného prostoru nebo objektu pomocí bezkontaktní a neselektivní metody měření, tedy že body jsou snímány v pravidelných intervalech.

Tyto vlastnosti s sebou přináší hned několik výhod, jaké udává například laboratoř fotogrammetrie ČVUT: automatický a systematický sběr bodů, vysoká hustota naměřených bodů a rychlost jejich zaměření, výpočty souřadnic v reálném čase

a možnost přiřadit bodům hodnotu odrazivosti skenovaného povrchu. Další výhody popisuje Haličková, Chlepková, Koska (2007): přesné zaměření skutečného stavu s výrazně vyšší produktivitou práce a s finančními úsporami, vyšší bezpečnost a zkrácení práce v terénu, měření může probíhat za plného provozu strojů, velmi rychlé zpracování 3D digitálních modelů. Díky těmto výhodám se lze s metodou laserového skenování setkat v mnoha oborech lidské činnosti jako je například stavebnictví, fotogrammetrie, topografie, dálkový průzkum Země, archeologie, zdravotnictví, strojírenský průmysl a mnoho dalších.

2.2.1 Princip laserového skenování

Zařízení, které je schopné generovat vlnu světla za použití jen velmi úzkého pásma spektra, se nazývá laser. Typický laser vydává světlo v úzkém, málo rozbíhavém paprsku s dobře definovanou vlnovou délkou (odpovídá konkrétní barvě, pokud laser pracuje ve viditelném spektru).

Laserové záření má několik charakteristik, které ho odlišují od klasického světla. Toto záření je generované ve formě paprsku s vysokým stupněm prostorové a časové koherence. Kombinace těchto koherencí vede k tomu, že paprsek se nachází v úzkém spektrálním pásmu.

Díky těmto charakteristikám je laserový paprsek zaostřen i při projekci na vzdálenou scénu. Další klíčovou vlastností je, že laserový paprsek se šíří s určitou konečnou rychlostí v daném prostředí. Tyto vlastnosti dělají z laserového paprsku vhodné záření pro měření objektů (Van Genechtenm, 2008).

Laserové skenování je založeno na principu měření tranzitního času průchodů laserového paprsku od přístroje k objektu a zpět (Hodač, 2002). Produktem, jak uvádí Koska, Křemen, Pospíšil (2009), je množina bodů tzv. mračno bodů.

2.2.2 Mračno bodů

Mračno bodů je hlavním výstupem při použití laserového skeneru. Výhodou mračna bodů je minimální čas na zpracování, tedy registraci, a velká hustota zaměřených bodů, díky čemuž může mít samotné mračno bodů dostačující vypovídající hodnotu o zkoumaném objektu. Pokud chceme vytvořit plnohodnotný 3D model, vždy potřebujeme více bodových mračen z více pozic. Každý bod vždy obsahuje informaci o své poloze pomocí souřadnic x , y a z . Jak uvádí Luhmann a kol. (2006) lze

k bodovému mračnu přidat digitální snímek. Pokud je digitální snímek zorientován, kalibrován a zabírá stejné území jako laserový skener, lze RGB informaci ze snímků přiřadit každému bodu mračna bodů.

2.2.3 Dělení laserových skenerů

Laserové skenery můžeme dělit podle několika kritérií. Jedním ze zásadních kritérií je způsob, jakým jsou data získána; triangulace, doba letu a porovnání fáze. Tyto skenery jsou popsány v tabulce č. 1 a níže v textu.

Systém skenování		Klíčové vlastnosti	Přesnost/ operační vzdálenost
Triangulace	Rotující scéna	<i>Objekty musí být dopraveny ke skeneru, vhodné pro malé objekty, kde je požadovaná velká přesnost</i>	<i>50 mikronů/ 0,1 až 1 m</i>
	Na rameni	<i>Lze přenést na cílové místo nebo použít ve studiu. Nevhodný pro skenování celých budov a staveb, ale vhodný pro skenování objektů o velikosti několika metrů.</i>	<i>50 mikronů/ 0,1 až 1 m</i>
	Přenosný/ na stativu	<i>Přenosný s velkou přesností. Nevhodný pro skenování celých budov. Ideální pro skenování menších architektonických prvků.</i>	<i>0,1 mm/ 0,1 až 2,5 m</i>
Doba letu		<i>Přenosný systém. Vytvoří snímek v rozmezí 5 – 10 minut. Vhodný pro skenování fasád budov a interiérů.</i>	<i>3 až 6 mm do vzdálenosti 100 m</i>
Porovnání fáze		<i>Přenosný systém. Rychle zaznamenává velké množství dat (gigabyty) téměř s fotografickým efektem.</i>	<i>5 mm do vzdálenosti 25 m</i>

Tab. č. 1: Přehled laserových skenerů (Barber, Dallas, Mills, 2006)

Další možné dělení laserových skenerů je podle dosahu, přesnosti, rychlosti skenování nebo velikosti zorného pole. Důležité rozdělení je také podle toho, kde je skener umístěn. Pokud je skener umístěn pevně na zemi jedná se o statický skener, pokud je skener umístěn na pohyblivém zařízení, tak hovoříme o kinematickém skeneru (Strapek, 2016).

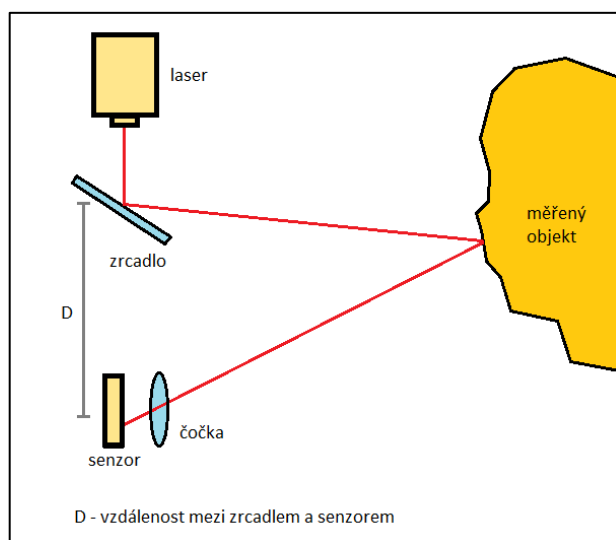
Právě využití leteckého laserového skenování pro zaznamenání zemského povrchu ve formě DMR (Digitální Model Reliéfu) nebo DMP (Digitální Model Povrchu) se v dnešní době velmi rychle rozvíjí a nahrazuje staré fotogrammetrické metody.

Některé výhody uvádí Baltsavias (1999):

- Mapování povrchů s malou až žádnou texturou nebo povrchů se špatnou definicí. Například zasněžené povrchy, písčité pobřeží, pouště a bažiny.
- Mapování lesů a zelených povrchů. Díky průniku laseru, lze provádět měření zemského povrchu.
- Mapování povrchů s úzkou a dlouhou charakteristikou. Například silnice, potrubí, vodní toky, správa pobřežních zón atd.
- Tvorba DMP zastavěných oblastí. Slouží k územnímu plánování, zjišťování výšky budov pro výstavbu komunikačních antén.
- Velké množství bodů umožňuje velmi přesné mapování otevřených jam, skládek, infrastruktury či povodní.
- Mapování malých objektů, například elektrické vedení. Tato výhoda je velmi důležitá, protože při využívání klasických metod jsou tyto malé objekty téměř neviditelné.
- Rychlé převedení informace do 3D souřadnic. Důležité například při přírodních katastrofách.

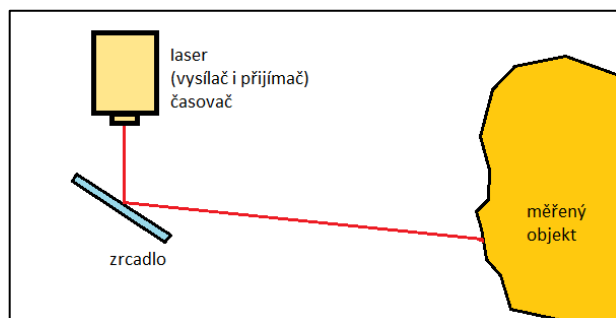
V případě **triangulačního skenování** laser generuje měřící paprsek, který je pomocí rotujícího zrcadla odkloněn na měřený objekt. Paprsek se poté odrazí od povrchu předmětu a je zaznamenán čočkou ve snímacím senzoru.

Umístění laseru na snímači a známá vzdálenost mezi zrcadlem a senzorem je společně se zaznamenaným úhlem zrcadla využita k vytvoření bodové souřadnice pomocí triangulace (viz Obr. č. 1). S tímto typem skenerů se lze nejčastěji setkat v laboratořích nebo speciálních studiích, protože se používají na velmi blízké skenování. Triangulační skenery často špatně pracují v jasném slunečním světle, proto musí být dočasně zastíněny (Mills, Andrews, 2011).



Obr. č. 1: Skenování triangulačním skenerem (Mills, Andrews, 2011)

Při **skenování pomocí doby letu** je opět na začátku laserem generovaný paprsek a navíc je spuštěn časovač. Otáčivé zrcadlo odklání paprsek, který zasáhne měřený objekt. Paprsek odražený od objektu putuje zpět do přijímací optiky a v tomto okamžiku je i zastaven časovač (viz obr. č. 2). Změřený čas a úhel zrcadla se použijí k výpočtu xyz souřadnic. V porovnání s triangulačními skenery se tento typ skenerů využívá například v architektuře, díky většímu dosahu (minimum 2 m, maximum až 300 m). Tyto skenery dokáží během minuty zaznamenat až desítky tisíc bodů (Mills, Andrews, 2011).



Obr. č. 2: Skenování pomocí doby letu (Mills, Andrews, 2011)

Skenování pomocí porovnání fází je velmi podobné metodě měření pomocí doby letu paprsku. Princip vyslání a přijetí laserového paprsku je stejný, ale v těchto zařízeních není časovač, protože se místo času měří změna signálu mezi vyslaným a přijatým paprskem. Díky této metodě mohou skenery zachytit velké množství dat (až miliony bodů za minutu). S velkým množstvím bodů však vzniká vyšší náročnost na počítačový hardware při dalším zpracování. Výhodou těchto skenerů je, že horizontálně mohou snímat v rozsahu 360° a vertikálně až v rozsahu 180° (Mills, Andrews, 2011).

2.3 Fotogrammetrie

Prvně slovo fotogrammetrie použil v roce 1867 Albrecht Meydenbauer průkopník fotogrammetrické dokumentace historických stavebních objektů v Německu. Pojem fotogrammetrie je odvozen z řeckých slov (fotos – světlo, gramma – písmo, záznam a métrisi – měření), tj. měření na záznamu pořízeném pomocí světla (Staněk, 2013).

Kemp (2008) definuje fotogrammetrii jako aplikovanou vědní disciplínu, která pomocí fotografických snímků získává trojrozměrnou informaci o zemském povrchu nebo vybraného objektu. Jedná se o bezkontaktní metodu měření. Dříve fotogrammetrie sloužila k vytváření klasických papírových topografických map. V dnešní době se používá hlavně k tvorbě digitálního modelu povrchu a 3D modelů. Fotogrammetrie je také důležitou metodou i mimo geografické vědy, používá se například v průmyslu, architektuře, biomechanice, medicíně, forenzním vyšetřování, virtuální realitě nebo archeologii.

Některé výsledky, které mohou poskytnout fotogrammetrické metody, uvádí Kraus (2007):

- Čísla – souřadnice jednotlivých bodů v trojrozměrném souřadnicovém systému
- Výkresy (analogicky) – mapy a plány s polohopisnými detaily a vrstevnicemi společně s dalšími graficky znázorněnými objekty
- Geometrické modely (digitálně) – ty jsou převáděny do informačních systémů
- Obrazy (analogicky i digitálně) – především rektifikované fotografie (ortofoto) a z nich odvozené fotomapy. Také fotomontáže a trojrozměrné fotomodely, což jsou CAD modely s texturou vytvořenou právě z fotografie

2.3.1 Dělení fotogrammetrie

Stejně jako v případě laserové skenování tak i fotogrammetrii lze dělit podle různých kritérií. Podle Pavelky (2003) jsou to tato kritéria:

- Poloha stanoviště
- Počet a konfigurace snímků
- Postup zpracování

První možné dělení je podle polohy stanoviště. Při tomto dělení je hlavním kritériem umístění měřické, či neměřické kamery. Lze tedy hovořit o pozemní, anebo o letecké fotogrammetrii.

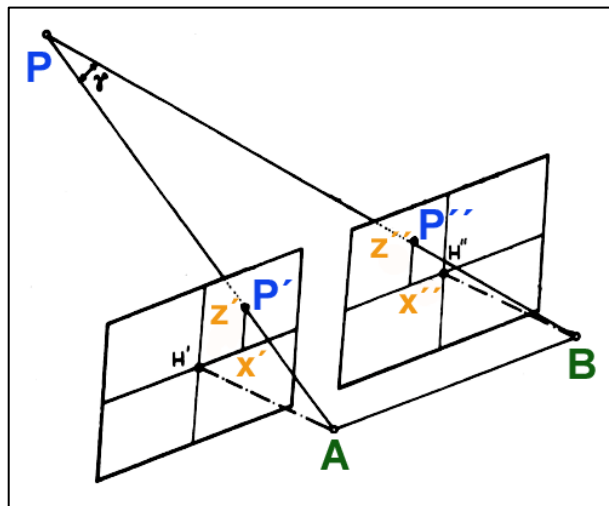
Při **pozemní fotogrammetrii** je kamera umístěna na zemi a nepohybuje se. Výhodou pozemní fotogrammetrie je její nízká náročnost na technické i fotografické vybavení. Při pořizování snímků lze zkoumaný objekt nebo prostor snímat delší dobu, a proto tato metoda není tak náročná na stav počasí. Nevýhodou je možné zakrytí snímaného objektu a snímek tak obsahuje velké množství nevyhodnotitelných oblastí. Tato metoda se hodí pro objekty s výškovou členitostí, které jsou ve stejné vzdálenosti od přístroje (fasády budov, skalnatý terén, stěny lomu). Dosah je závislý na typu měřické kamery a je zhruba 500 m (Böhm, 2002). S rozvojem digitálních aparátů a počítačových aplikací roste význam této metody.

Při **letecké fotogrammetrii** je kamera umístěna na pohyblivém nosiči. Využití této metody je vhodné pro mapování větších, nepřístupných území nebo územích postižených přírodní katastrofou. Výhodou je bezkontaktní měření, krátká doba sběru dat, zachycení aktuálního stavu a možnost periodického snímkování. Nejčastějším produktem letecké fotogrammetrie je v současné době digitální ortofoto a DMT (Staněk, 2013).

Fotogrammetrie lze dělit podle toho, s kolika snímky se pracuje. Existuje tedy jednosnímková a vícesnímková fotogrammetrie. U jednosnímkové metody nejsme schopni získat 3D informaci, ale pouze opět 2D souřadnice. Slovník VÚGTK definuje jednosnímkovou fotogrammetrii takto: „část fotogrammetrie, zabývající se zjišťováním plošných geometrických vlastností objektů z jednotlivých fotografických měřických snímků na základě projektivní transformace obrazu v rovině snímku do roviny mapy (plánu)“. Vícesnímkovou fotogrammetrii můžeme dále dělit na stereofotogrammetrii, průsekovou fotogrammetrii a SfM (Structure From Motion), kterou můžeme charakterizovat jako kombinaci stereofotogrammetrie a průsekové fotogrammetrie (Šimíček 2014).

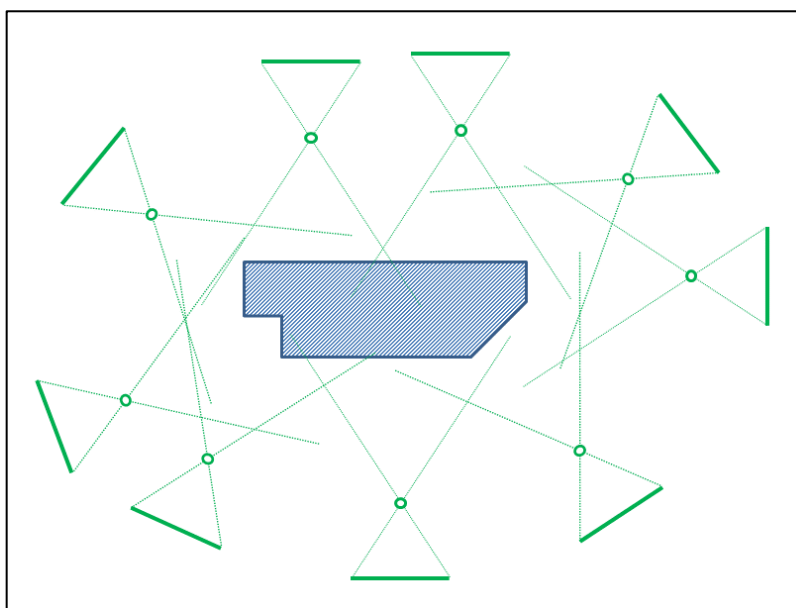
Stereofotogrammetrie je metoda, při které jsou pro měření použity minimálně dva snímky. Tato metoda funguje na stejném principu jako lidský zrak, výsledkem je takzvaný stereoskopický vjem. Základem tohoto vjemu je konvergence očních os a akomodace očních čoček. Dochází tedy k tomu, že pravé i levé oko vytvoří rozdílný obraz, který je následně v mozku spojen v jeden vjem – přirozený prostorový vjem (Bílá, 2012). Stereoskopický vjem lze vytvořit i uměle pomocí dvou snímků téhož objektu pořízených z jiného stanoviska. Tyto snímky se nazývají stereodvojice. Je nutné, aby osy záběru jednotlivých snímků byly rovnoběžné a aby snímky byly stejného měřítka (Dobrovolný, 2006).

V ideálním, tedy normálním stereofotogrammetrickém případě (viz obr. č. 3) je epipolární přímka rovnoběžná s osou x (vertikální paralaxa je nulová) a vzniká pouze horizontální paralaxa (Luhmann a kol., 2006). Díky těmto paralaxám lze zjistit prostorovou informaci snímaného území nebo objektu a tím získat 3D souřadnice.



Obr. č. 3: Normální případ stereofotogrammetrie (Bílá, 2012)

Pokud je více pořízených snímků kolem celého objektu hovoříme o **průsekové fotogrammetrii**. Průseková fotogrammetrie je jedna z nejstarších fotogrammetrických metod, která umožňuje vyhodnocení prostorových souřadnic předmětu na základě překryvu dvou a více měřických snímků (viz obr. č. 4). Principem určení prostorových souřadnic bodů předmětu je vzájemná konvergence (sbíhavost) os záběru snímků (Pavelka, 2003).

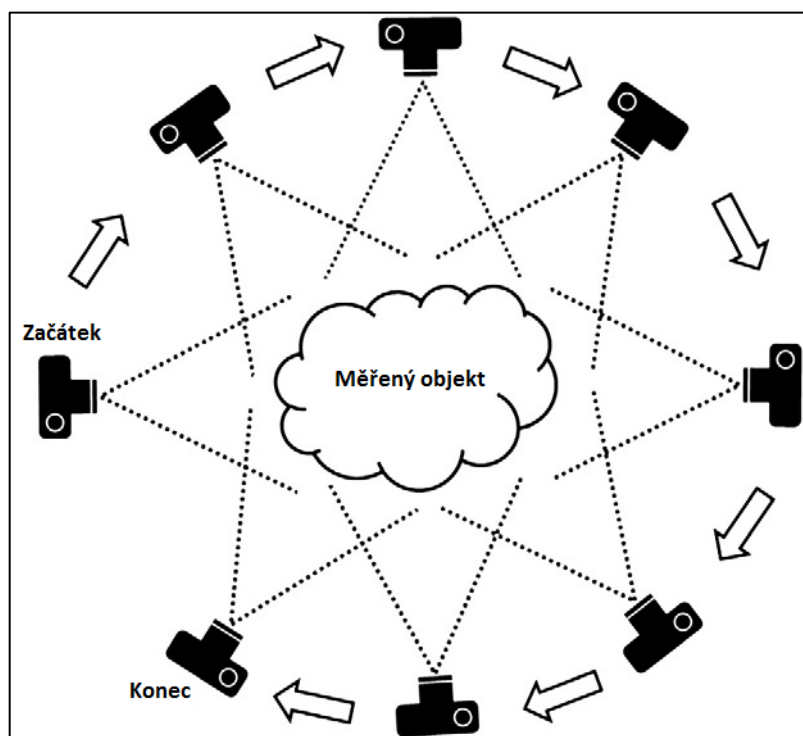


Obr. č. 4: Schéma průsekové fotogrammetrie (Luhmann a kol, 2006)

Tato metoda se dříve používala k mapování nepřístupných horských masívů na vzdálenost několika kilometrů. V dnešní době se průřezová fotogrammetrie využívá na mnohem kratší vzdálenosti (hovoříme o blízké fotogrammetrii) pro zkoumání menších objektů. S touto metodou se lze setkat při dokumentaci stavebních objektů, při určování velikosti a tvaru různých předmětů, ale také například při dokumentaci dopravních nehod (Staněk, 2013).

Výhodou této metody je její relativně nízká cena, možnost snadné manipulace s kamerami a tedy možnost vytvoření velkého množství snímků z mnoha úhlů. Nevýhodou může být nedostatečná a problematická automatizace sběru dat (Lerma a kol., 2010). Bílá a Šedina (2014) uvádí jako další nedostatek určení měřítka vytvořeného modelu, protože počítačové aplikace zpracovávající snímky používají relativní orientaci kamer.

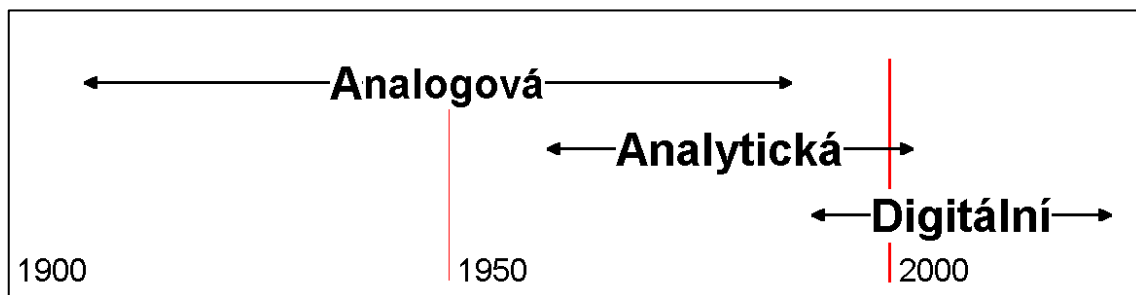
Poslední výše zmíněnou metodou je metoda pojmenovaná **structure from motion**. Při použití této metody jsou snímky pořízeny stejně jako v případě průřezové fotogrammetrie, ale navíc se bere v potaz pořadí snímků a pohyb kamery (viz obr. č. 5). Díky tomu může být korelace mezi obrazovými body automaticky vypočítána pomocí algoritmů a struktury scény (Snavely, 2008).



Obr. č. 5: Schéma metody structure from motion (Westoby, Brasington, Glasser a kol., 2012)

Westoby, Brasington, Glasser a kol. (2012) uvádí, že vzhledem k variaci ve složitosti, osvětlení a materiálech v jednotlivých scénách není možné výslovně určit minimální počet fotografií pro úspěšnou rekonstrukci scény. Minimálním požadavkem je, aby souhlasné rysy byly viditelné minimálně na třech fotografiích.

Rozdělení **podle postupu zpracování** koresponduje s časovým vývojem fotogrammetrie (viz obr. č. 6). Jednotlivé postupy zpracování se měnily s příchodem nových technologií od analogových, přes analytické, až po digitální.



Obr. č. 6: Postupy zpracování ve vývoji v čase (Hodač, 2002)

Při **analogovém zpracování** se používají klasické snímky, které jsou zpracovány s využitím opticko-mechanického přístroje.

Během **analytického zpracování** se stejně jako v předchozí metodě používají klasické snímky, ale jejich zpracování je odlišné. V tomto případě je celý proces analýzy počítán počítačem.

Nejmodernějším postupem je **digitální zpracování**. Pro toto zpracování jsou využívány digitální snímky, které se liší tím, že nejsou, jako v případě klasických snímků zaznamenávány emulzí citlivou na světlo, ale pomocí elektronických detektorů. Dále jsou tyto snímky počítačově zpracovány (Kraus, 2007).

2.4 Paleontologický artefakt

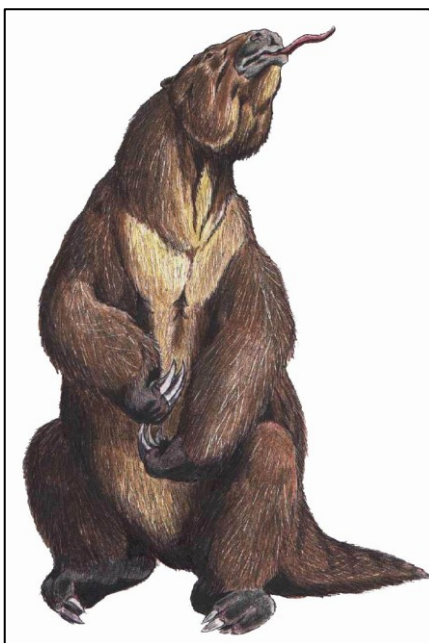
Zapůjčený paleontologický artefakt patří do sbírky Chlupáčova muzea historie Země. Jedná se o realistický model lebky (viz obr. č. 7) živočicha Megatherium.

Megatherium je označení pro rod již vyhynulého pozemního lenochoda. Místem výskytu těchto zvířat byla Jižní Amerika a z části byla kolonizována i Severní Amerika. Megatheria žila v období pozdního miocénu až do období pozdního pleistocénu (De Iuliis, Pujos, Tito, 2009).

Největším druhem je *Megatherium americanum* (viz obr. č. 8), který vážil až 4 tuny. Rod *Megatherium* je řazen mezi býložravce, který se živí listy stromů. Takto je usuzováno hlavně na základě podobnosti se současně žijícími stromovými lenochody. Některé studie uvádí, že by se mohli některá *Megatheria* živit i pastvou (Bargo, 2001).



Obr. č. 7: Model lebky



Obr. č. 8: Megatherium americanum (Wikipedia, 2007)

3 Sběr dat

V této části práce jsou popsány použité přístroje, příprava snímkaného objektu a vytvořená data. V první části kapitoly je popsáno snímání pomocí měřické kamery a v druhé polovině kapitoly je popsáno použití a nastavení laserového skeneru.

3.1 Měřická kamera

Při klasické fotogrammetrické činnosti se nejčastěji používají klasické měřické kamery. Tyto kamery mají vždy známé a stálé prvky vnitřní orientace. Mezi prvky vnitřní orientace patří konstanta kamery, poloha hlavního snímkového bodu a znalost průběhu distorze. **Konstanta kamery** je vzdálenost hlavního snímkového bodu od středu promítání obrazovém prostoru. **Hlavní snímkový bod** je průsečík roviny snímku s paprskem procházejícím středem promítání v obrazovém prostoru a kolmým na rovinu snímku. **Distorze** je souhrn zbytkových vad objektivu projevující se posunem obrazu bodu od jeho správné polohy v rovině snímku, distorzi můžeme dělit na radiální nebo tangenciální (VÚGTK, 2017). Pokud je používán klasický digitální fotoaparát označuje se jako měřická kamera, u které jsou prvky vnitřní orientace neznámé nebo nedostačující. Prvky vnitřní orientace lze zjistit pomocí kalibrace.

Pro získání dat k tvorbě modelu byl použit digitální fotoaparát NIKON D750, který zapůjčila katedra aplikované geoinformatiky a kartografie. Jedná se tedy o měřickou kameru. I přes výše uvedené nedostatky je použití této kamery vyhovující, protože použitý software Agisoft Photoscan provádí během zpracování snímků autokalibraci.

Vhodnost použitého fotoaparátu lze potvrdit tím, že splňuje všechny požadavky udávané v manuálu pro software Agisoft Photoscan. Prvním požadavkem je minimální rozlišení kamery 5 Mpx. Dalším požadavkem je délka ohniskové vzdálenosti, které je ideálně v rozmezí 20 – 50 mm (Agisoft LLC, 2016). Použitý fotoaparát NIKON D750 disponuje rozlišením 24,3 Mpx a ohnisková vzdálenost je 24 mm.

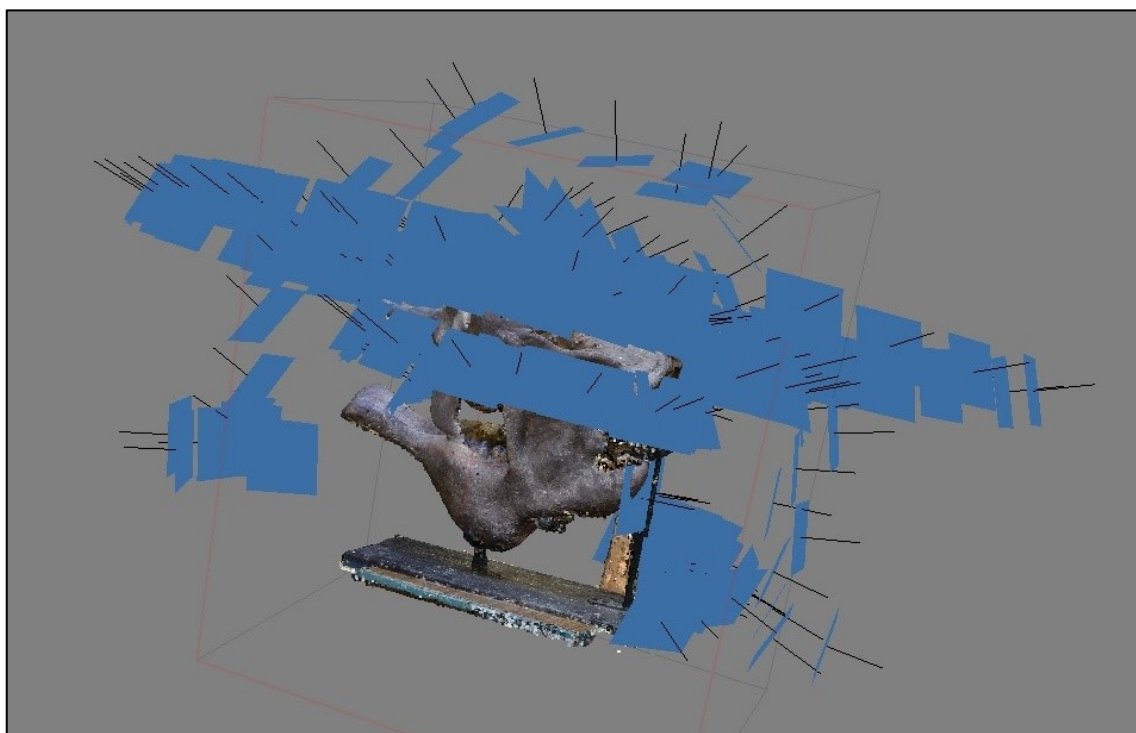
3.2 Pořízení snímků

Před samotným snímáním je důležité přizpůsobit scénu a ujistit se zda zvolený objekt je vhodný pro využití fotogrammetrické metody. Objekt by měl být

přístupný ze všech stran tak, aby se v popředí nevyskytovaly nežádoucí předměty, které by zastiňovaly snímáný objekt. Je dobré se také vyvarovat pohybujícím předmětům v prostředí scény. Snímáný objekt by měl splňovat tato kritéria: povrch by měl mít texturu a neměl by být lesklý, zrcadlíci nebo průhledný, dále by objekt neměl být příliš plochý.

Vybraný model lebky výše zmíněná kritéria splňuje. Navíc na jeho podstavu byly umístěny značky. Vzdálenost mezi značkami byla změřena a využita pro vytvoření měřítka tak, aby digitální model odpovídal reálnému modelu. Po přípravě scény lze přistoupit k samotnému pořizování snímků.

Při snímkování musela být dodržena další kritéria správného sběru dat. Veškeré snímky byly pořízeny se stejným nastavením ohniskové vzdálenosti, bez použití zoomu a bez použití blesku. Snímky byly pořízeny kolem celého objektu, tak aby se dostatečně překrývaly a aby zachytily co největší plochu modelu. Dále byly nasnímány veškeré detaily lebky, protože její povrch byl značně členitý. Umístění snímků lze vidět na obrázku č. 9.



Obr. č. 9: Rozmístění snímků kolem modelu

Takto bylo získáno celkem 173 snímků. Výsledné snímky jsou ve formátu JPEG, který je podporován použitým softwarem. Velikost každého snímku je 6016 x 4016 px. Horizontální i vertikální rozlišení je 300 dpi. Bitová hloubka je 24 v barevném rozlišení

RGB. Každý snímek obsahuje navíc EXIF informaci o metadatech. Metadata jsou důležitá pro následující autokalibraci. Získané snímky nebyly nijak oříznuty, či jinak upraveny, protože by mohlo dojít k nepřesnému nebo žádnému zpracování.

3.3 Laserový skener

Kromě použití klasického fotoaparátu byl ke sběru dat také použit laserový skener. Skener byl opět zapůjčen od katedry aplikované geoinformatiky a kartografie, jedná se o přístroj Trimble TX5 (viz obr. č. 10). Skener pracuje na principu porovnání fází, který byl více popsán v kapitole 2.2.3. Skener může pořizovat až 976 000 bodů za sekundu do vzdálenosti 120 m. Dále je vybaven fotoaparátem, díky kterému lze naskenovaným bodům připsat RGB informaci. Veškerá data jsou ukládána na SD kartu (Laserscanning Europe, 2017).



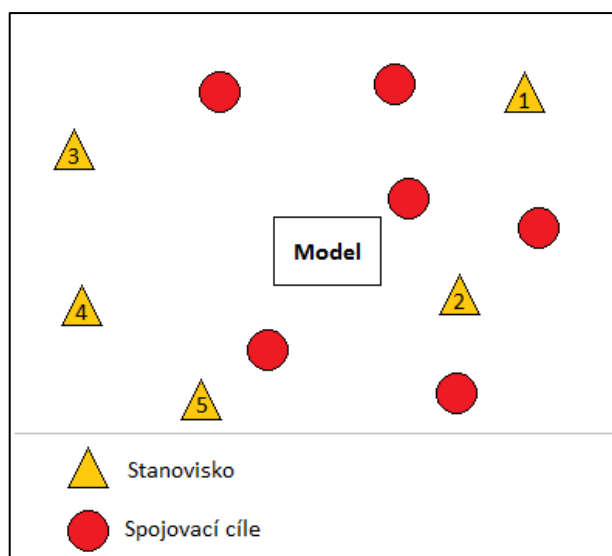
Obr. č. 10: Laserový skener Trimble TX5(Trimble, 2003)

3.4 Skenování modelu

I v případě laserového skenování musí být před sběrem dat připravena scéna kolem objektu. Opět by sběr dat neměl probíhat za přímého slunečního svitu, při dešti, sněžení, či v mlze. V případě vlastního skenování nebyl s touto podmínkou problém, protože skenování probíhalo v místnosti.

Důležitým krokem během přípravy scény je správné rozmístění stanovisek a spojovacích cílů. Tyto cíle slouží ke spojení jednotlivých výstupů z každého stanoviska a vytvoření jednoho bodového mračna. Plán rozmístění je na obrázku č. 11. Místa pro stanoviska byla stanovena tak, aby skener mohl snímat celý model lebky, a zároveň

aby byly vždy viditelné minimálně tři spojovací cíle. Jako spojovací cíle byly vybrány bílé koule o průměru 139 mm. Cíle byly rozmístěny v různých výškách a vzdálenostech od stanovisek a modelu lebky tak, aby nebyly v jedné rovině. Minimální vzdálenost mezi cíli byla vždy alespoň 1 m. Rozmístění odpovídá požadavkům uvedeným v manuálu. Během procesu skenování nesmí dojít k přesunutí spojovacích cílů, protože by mohla být značně ztížena registrace pořízených dat. Větší množství stanovisek bylo zvoleno s ohledem na různorodost povrchu skenovaného modelu lebky. Skenovací zařízení je vždy na stanovisku horizontováno a upevněno na stativu.



Obr. č. 11: Rozmístění stanovisek a spojovacích cílů

Ve chvíli, kdy je scéna připravena, lze přistoupit k nastavení skeneru. Jako první krok se musí nastavit nový projekt, do kterého budou ukládána veškerá naskenovaná data z každé stanice.

Po vytvoření projektu musí být vybrán profil skenování. Trimble TX5 nabízí několik předdefinovaných, anebo si lze veškeré parametry profilu samostatně nadefinovat. Výběr profilu se odvíjí od vzdálenosti, na kterou chceme skener použít. Na výběr je z těchto profilů: Indoor ...10m, Indoor 10m..., Outdoor ...20m a Outdoor 20m... V mém případě byl vybrán profil Indoor ...10m, protože skenovaný objekt se nacházel v místnosti a od skeneru byl ve vzdálenosti do 10 m.

Prvním atributem nastavení je **rozlišení a kvalita**. Ve zvoleném profilu je předem rozlišení nastaveno na hodnotu 1/8 a kvalita je nastavena na 3x. Toto nastavení má vliv na počet bodů, objem zpracovaných dat a celkový čas skenování.

Druhým atributem je **rozsah**, ten je při zvoleném profilu nastaven na 0° až 360° v horizontálním směru a na 90° až -60° ve vertikálním směru. V mém případě stačilo nastavit horizontální rozsah na 180°. Tento atribut je jediný, který byl v předdefinovaném profilu změněn.

Jak bylo výše zmíněno, Trimble TX5 je vybaven fotoaparátem, a umí pořizovat barevné snímky. S tím souvisí nastavení dalšího atributu a to **barvy**. Lze pořizovat snímky bez nebo s informací o barvě každého bodu. Na výběr je ze tří režimů měření expozice: rovnoměrný, horizontální a vertikální (viz obr. č. 12). Pro tento skener byl nastaven horizontální režim měření expozice. Tento režim byl nejvhodnější, protože omezil příliš jasné záření vycházející ze stropních světel.

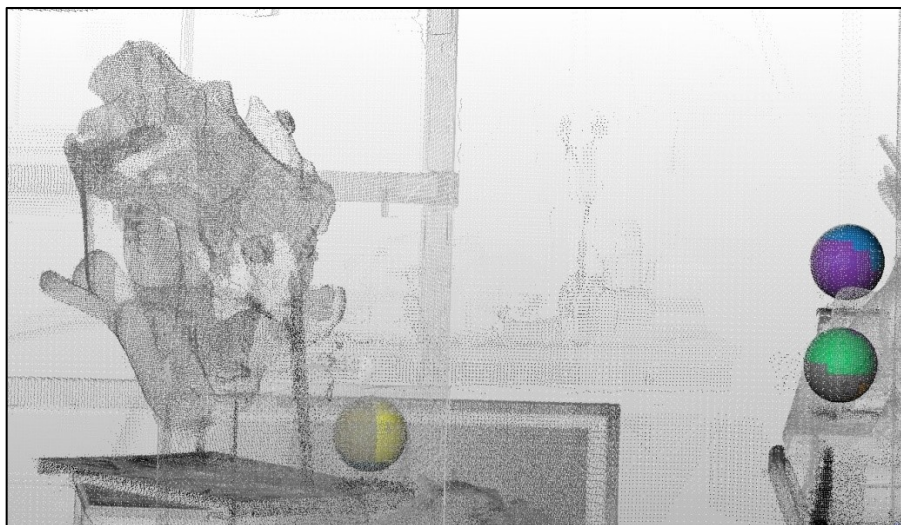


Obr. č. 12: Režim měření expozice, vlevo rovnoměrný režim, uprostřed horizontální režim, vlevo vertikální režim (Trimble, 2003)

Nastavení profilu nabízí ještě další možnosti vylepšení sběru dat. První je stanovení jednoznačné linie objektu. To je potřeba pokud jeden paprsek laseru dopadne na hranu a zasáhne dva objekty. Pokud se tak stane, jsou tyto body z měření vymazány. Druhým vylepšením je odmazání bodů, které nezasáhnou žádný objekt. Tento problém nastává hlavně při skenování ve venkovních prostorech, kde jsou paprsky vysílány směrem k obloze (Trimble, 2003).

S takto nastaveným skenerem bylo pořízeno měření na každém stanovišti. Každé měření trvalo přibližně 5 až 7 minut a vždy bylo naskenováno mezi 5 000 000 až 7 000 000 body.

Výsledkem je FLS soubor pro každé měření, ve kterém je informace o bodech, barvě a vlastnostech. Bodové mračno s výrazněnými spojovacími body je zobrazeno na obrázku č. 13.



Obr. č. 13: Bodové mračno se spojovacími body

4 Tvorba modelu

Tato kapitola pojednává o hlavním cíli práce a to je vytvoření 3D modelu z pořízených dat. Nejprve jsou popsány všechny potřebné programy pro zpracování dat a následné jednotlivé postupy vytváření digitálního 3D modelu. V závěru kapitoly je provedeno hodnocení přesnosti.

4.1 Použité programy

Pro zdárné vytvoření digitálního 3D modelu bylo využito několik počítačových programů. V případě zpracování dat z laserového skenování byl použit program Trimble RealWorks. Ze zpracovaných dat byl vytvořen model v programu MashLab. Pro zpracování dat ze snímků a následné vytvoření modelu byl využit program Agisoft PhotoScan. Pro stejný účel posloužil i program Autodesk ReMake.

První výše zmíněný program je **Trimble RealWorks**. Tento komerční software vyvíjí firma Trimble a je přímo určený pro zpracování dat získaných z mnou použitého skeneru Trimble TX5. Program slouží pro registraci, vizualizaci, zkoumání nebo manipulování s bodovým mračnem. Trimble RealWorks může být tedy použit například ke správě, či analýze velkých datových souborů, provádění měření, extrahování cíle z naskenovaných dat, automatické registraci, exportování dat a mnoho dalšího.

Při tvorbě mého modelu byly využity hlavně funkce pro registraci a následný export bodového mračka. Program podporuje pouze operační systémy od firmy Microsoft, tedy Windows 7, 8 a 10. Vyžaduje procesor s minimální frekvencí 2,8 Ghz, dále RAM s minimální kapacitou 8 GB a grafickou kartu s minimálně s 1 GB VRAM (Trimble, 2016). Pro maximální využití programu a plynulost práce byl instalován a používán na výkonném školním počítači.

Pro vytvoření modelu z registrovaných snímků byl použit program **MeshLab**. Jedná se o open source software, který byl vytvořen Fakultou Informatiky na Univerzitě v Pise. Hlavním využitím programu by mělo být zpracování bodového mračka a vytvoření 3D modelu. Vývojáři chtějí, aby software sloužil uživatelům, kteří se 3D modelováním nemají tolik zkušeností a zároveň je navržen tak, aby pokročilí uživatelé mohli přidávat nebo rozšiřovat funkce programu a upravovat veškeré parametry nastavení (Cignoni a kol., 2008). Výhodou MeshLabu je jeho kompatibilita s většinou operačních systémů.

Třetí použitý program je **Agisoft PhotoScan**, který byl použit v případě metody průsekové fotogrammetrie. Tento komerční software vyvíjí společnost Agisoft LLC. Hlavní funkcí je plně automatické vytváření texturovaných 3D modelů ze snímků pořízených měřickou, či neměřickou kamerou. Doporučenými požadavky jsou procesor Intel Core i7 a 12 GB RAM (Agisoft LLC, 2016). Stejně jako v případě softwaru Trimble Realworks byl i Agisoft PhotoScan využíván na výkonném školním počítači.

Pro zpracování snímků byl také použit program **Autodesk ReMake**, ke kterému byla získána studentská licence. Lze importovat již vytvořené 3D modely z jiných programů, které se mohou dále jednoduše upravovat. Vytvořený model lze publikovat a sdílet online anebo jej exportovat. Tento software je oproti předchozímu programu na zpracování snímků více uživatelsky přívětivý, protože umožňuje vytvářet model přes cloud plně automaticky a díky tomu není potřeba tak silného hardwarového vybavení (Autodesk, 2016).

4.2 Model z dat laserového skenování

V této části je popsáno vytvoření modelu z dat pořízených pomocí laserového skenování. Je vysvětlen celý postup, který začíná nahráním a registrací bodového mračka v programu Trimble RealWorks. Následuje vytvoření trojúhelníkové sítě a textury v programu MashLab.

4.2.1 Registrace

Prvním krokem při zpracování dat získaných skenerem je tzv. registrace. Během registrace se díky spojovacím cílům rozmístěným před skenováním provede sloučení všech bodových mračen do jednoho. Registrace byla provedena v programu Trimble Realworks.

Měřená data musí být naimportována do programu, jedná se o celou složku FLS. Během prvního importu je vždy vytvořen nový projekt ve formátu RWP (speciální formát používaný firmou Trimble) a složka RWI, která obsahuje všechna data a je propojená s projektem. Oba soubory jsou pojmenovány totožně.

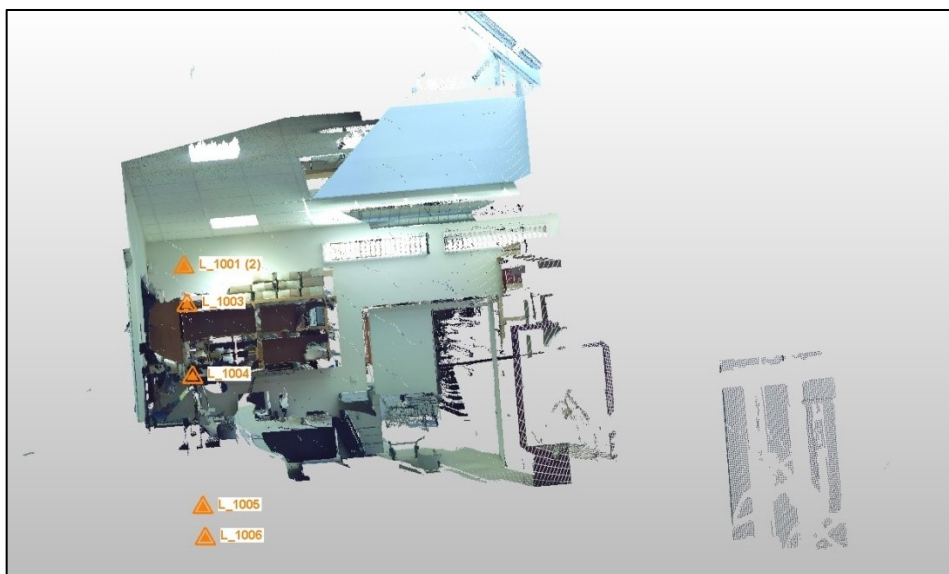
Data z jednoho stanoviště jsou po vložení zobrazena jako barevný snímek (viz obr. č. 14) ve formátu TZF (speciální formát pro naskenovaná data využívaný firmou Trimble).



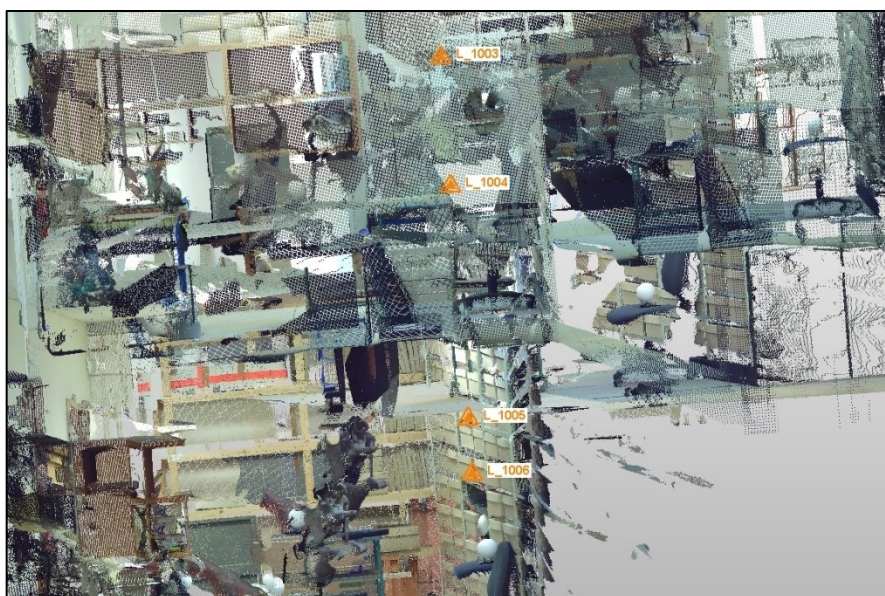
Obr. č. 14: Výsledný TZF snímek z jednoho stanoviště

Z každého TZF snímku je pomocí funkce *Create Sample Scan* vytvořeno bodové mračno. Jako typ vzorkování se použije prostorové vzorkování, které uchovává detaily, dále se může nastavit filtrace, ale tento atribut není nutný, protože bodové mračno může být oříznuto přesněji i v pozdějších fázích úpravy.

Na obrázku č. 15 lze vidět, jak vypadá jeden sken (*Sample Scan*) z jednoho stanoviska a na obrázku č. 16 je zobrazen *Sample Scan* ze všech stanovisek zároveň, kde ještě nedošlo ke spojení do jednoho bodového mračna.



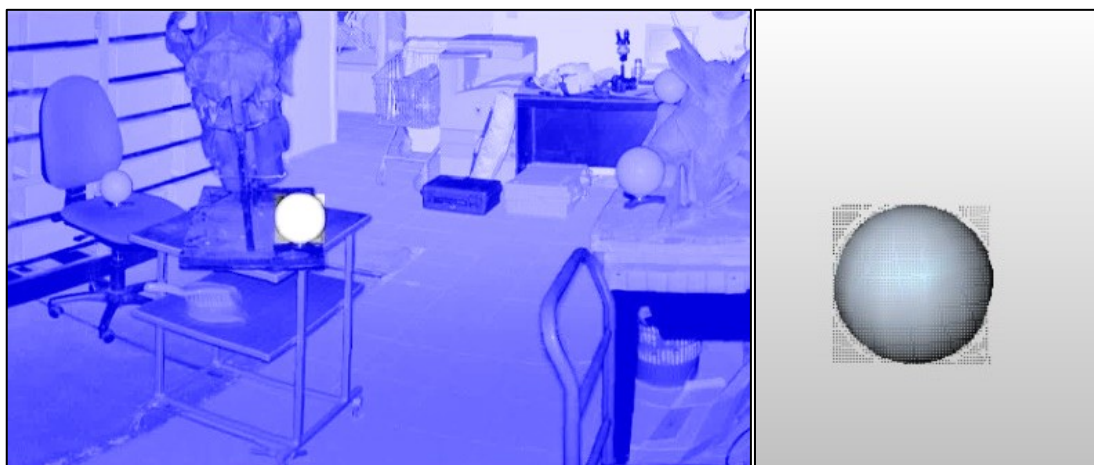
Obr. č. 15: *Sample scan* pro data získaná z jednoho stanoviska



Obr. č. 16: *Sample scan* pro všechna získaná data ze všech stanovisek

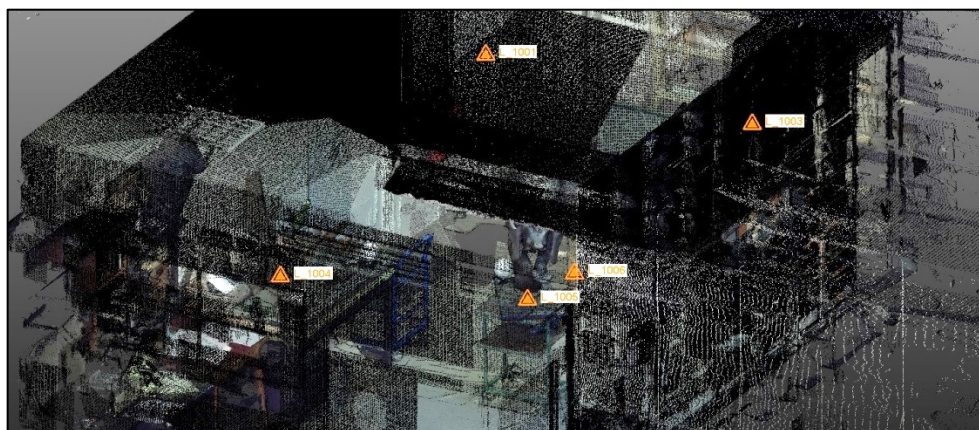
Jak je patrné z obrázku č. 16 získaná data mají velmi podobné souřadnice, ale ne totožné. Pro spojení všech bodových mračen využijeme spojovací body, v mém případě bílé koule, které byly rozmístěny ve scéně před skenováním. Trimble RealWorks nabízí plně automatické vyhledání spojovacích cílů na snímcích nebo lze tyto cíle vyhledat a zadat ručně. V mém případě jsem použil ruční vyhledání, tedy funkci *Target-Based Registration*.

Ruční vybírání spojovacích cílů je zobrazeno na obrázku č. 17, kde je v horní části zobrazen celý sken s vybraným cílem. Manuální výběr velmi usnadní správné nastavení parametrů. V mém případě software po kliknutí na vybraný cíl vyhledával objekt kulovitého tvaru o průměru 139 mm. Vždy byl nalezen a vybrán celý cíl bez obtíží. Pokud by nebyl vybrán celý cíl, uživatel může výběr uzpůsobit v podokně *Fitting* (viz obr. č. 18).



Obr. č. 17 (vlevo): Výběr spojovacích bodů z celého snímku
Obr. č. 18 (vpravo): Úprava výběru v podokně *Fitting*

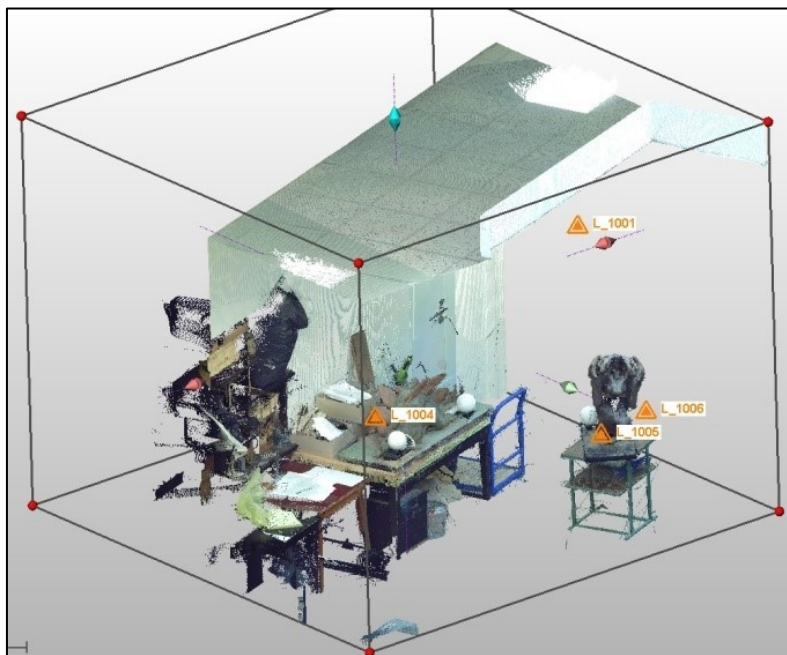
Při zpracování dat z prvního stanoviště musí být ručně vytvořeny všechny cíle, u dalších stanovišť se odpovídajícím cílům přiřadí již vytvořené. Tímto krokem bylo docíleno toho, že na každém snímku známe přesnou polohu totožných spojovacích cílů. Ve chvíli, kdy jsou nalezeny všechny cíle, může být provedeno spojení dat do jednoho bodového mračka. Výsledek lze vidět na obrázku č. 19, nyní mají veškerá data jednotný souřadnicový systém a vytváří bodové mračno, které již nese přesnou prostorovou informaci. Takto upravená data jsou úspěšně registrována.



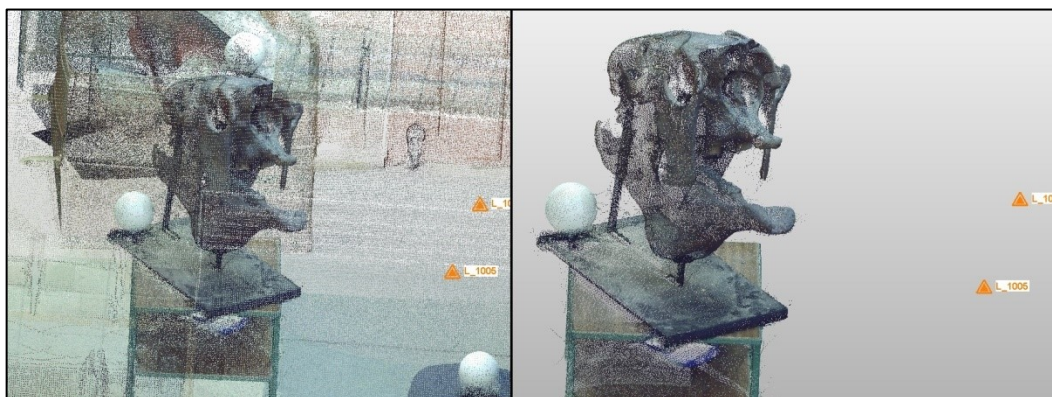
Obr. č. 19: Registrované bodové mračno

4.2.2 Ořez bodového mračna

Výsledné bodové mračno je tvořeno přesně 32 828 142 body, avšak většina těchto bodů nepřípadá na model lebky, který je předmětem mé práce. Pro vytvoření digitálního modelu je důležité pracovat pouze s bodovým mračnem reprezentujícím daný objekt, proto musí být bodové mračno oříznuto. K tomuto účelu slouží funkce *Limit Box Extraction* (viz obr. č. 20). Na obrázku č. 21 lze vidět zvýšení přehlednosti dat, pokud zobrazují pouze zkoumaný objekt.

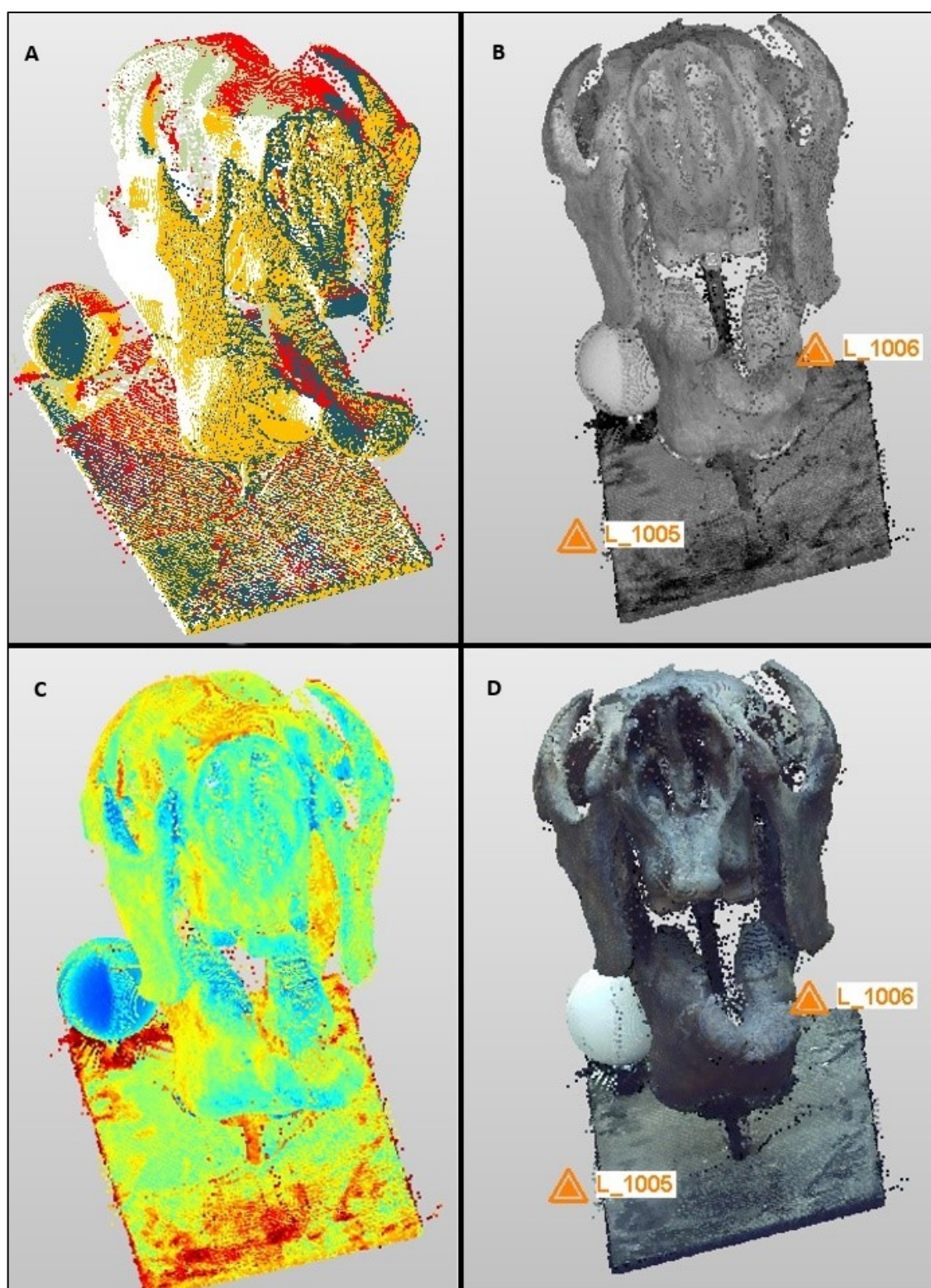


Obr. č. 20: Funkce *Limit Box Extraction*



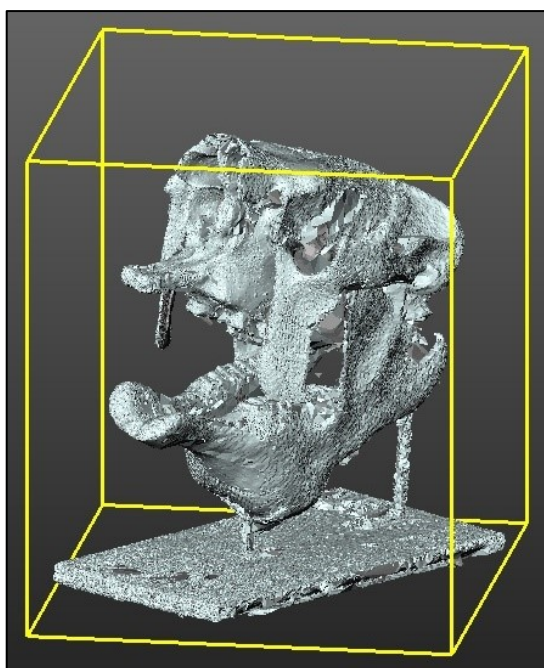
Obr. č. 21: Úprava scény (Vlevo celé bodové mračno, vpravo pouze mračno s objektem zájmu)

Na takto upraveném bodovém mračnu lze provádět například základní úpravy vykreslování, či měření vzdáleností. Různé příklady vykreslování jsou zobrazeny na obrázku č. 22.



Obr. č. 22: Vykreslování bodového mračna
(A- station color, B- grey-scaled, C- color-coded intensity, D- true color)

Z bodového mračna lze vytvořit trojúhelníkovou síť. Program Trimble RealWorks nabízí v části *Production* funkci *Mesh Creation*. Tato funkce nefunguje velmi dobře pro objekty se složitější strukturou, jako je model lebky v mém případě. Nejlepšího výsledku bylo dosaženo při nastavení bez projekce (viz obr. č. 23), další možností je použít rovinnou nebo válcovou projekci. Vytvořený model se skládal z 521 715 trojúhelníků a byl vytvořen z bodového mračna obsahující 433 850 bodů. Vytvořený model obsahoval mnoho ostrých hran a samotných trojúhelníků nespojených s modelem, proto byl nevyhovující.

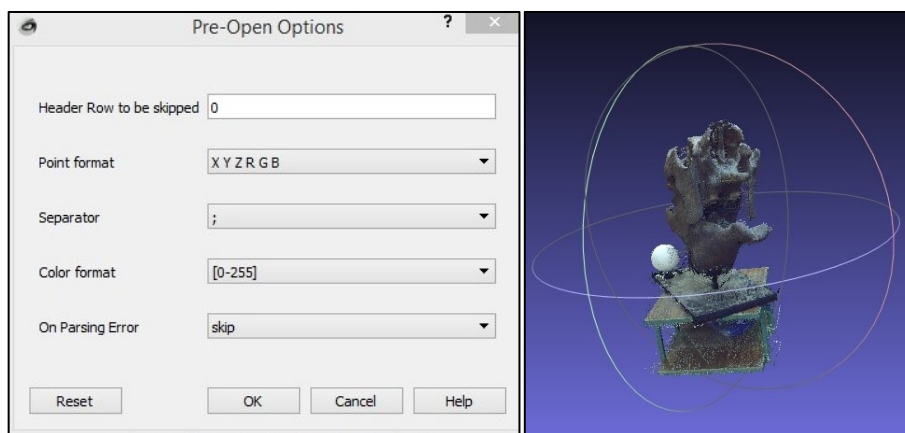


Obr. č. 23: Model lebky vytvořen v Trimble RealWorks

4.2.3 Export a Import dat

Aby mohl být vytvořen vhodnější digitální model lebky v programu MeshLab muselo být bodové mračno exportováno. MeshLab dokáže importovat několik formátů, například: 3DS, OBJ, PLY, STL ASC, TXT. Z programu Trimble RealWorks bylo ořezané bodové mračno exportováno do souboru ASCII. Tento soubor obsahoval prostorovou informaci každého bodu danou souřadnicemi x, y a z. Dále obsahoval informaci o barvě každého bodu vyjádřenou RGB hodnotami v 24bitové barevné hloubce.

Při importu do MeshLabu musela být správně zvolena struktura importovaného souboru, aby se bodové mračno vykreslilo správně a obarvené (viz obr. č. 24, 25). Pro lepší manipulaci se souborem bodového mračna byl změněn formát z ASCII na PLY.

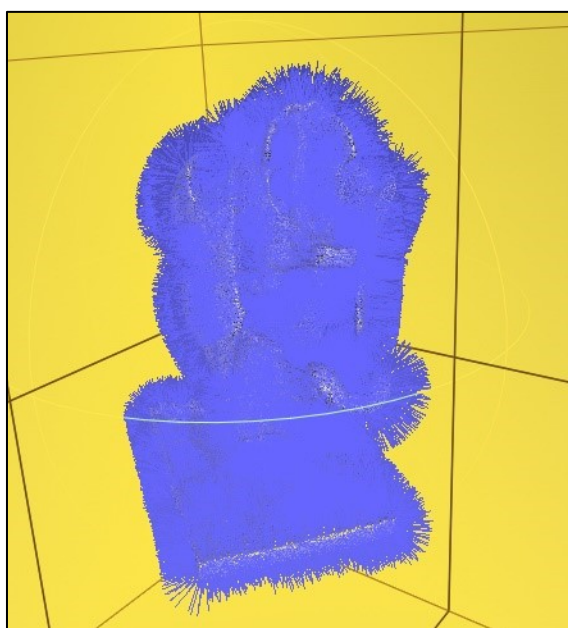


Obr. č. 24 (vlevo): Nastavení struktury importovaného souboru

Obr. č. 25 (vpravo): Načtené bodové mračno

4.2.4 Vytvoření modelu v MeshLab

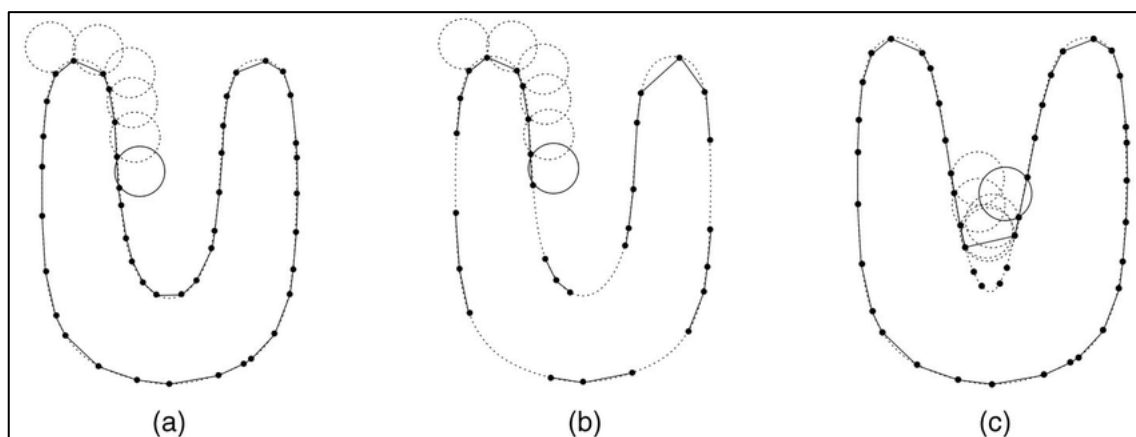
Prvním krokem je výpočet normál pro každý bod. Výpočet byl proveden pomocí funkce *Compute normals for point sets*. Nejdůležitějším atributem této funkce je počet sousedících bodů, ze kterých bude vypočítána normála pro jeden bod. V mém případě byla zvolena hodnota 10. Ostatní atributy byly ponechány beze změny. Normály mohou být zobrazeny příkazem *Show Normal* v záložce *Render*, výsledek je zobrazen na obrázku č. 26.



Obr. č. 26: Normály mračna bodů

Pokud má každý bod vypočtenou normálu, může být vytvořena trojúhelníková síť. MeshLab nabízí několik algoritmů pro vytvoření povrchu modelu. Dva základní algoritmy jsou Ball Pivoting a Poissonova rekonstrukce.

Název algoritmu **Ball Pivoting** přesně označuje princip tvorby trojúhelníkové sítě touto metodou. Na počátku je umístěna koule o zvoleném poloměru do oblasti tří bodů. Poté dojde k rotaci koule, která je stále v kontaktu se dvěma body, ve chvíli, kdy dojde k protnutí mezi rotující koulí a třetím bodem, dojde ke spojení všech tří bodů a je vytvořen trojúhelník. Následuje hledání dalších bodů kolem každé strany nově vytvořeného trojúhelníku (Bernardini a kol., 1999). V ideálním případě dojde ke spojení všech bodů. Zpracovaná data mohou obsahovat chybu v podobě děr nebo vynechání části bodů z trojúhelníkové sítě (viz obr. č. 27). Vlastní model vytvořený pomocí Ball Pivoting algoritmu lze vidět na obrázku č. 28. Model vytvořený tímto algoritmem je tvořen 665 174 trojúhelníky a obsahuje mnoho děr.

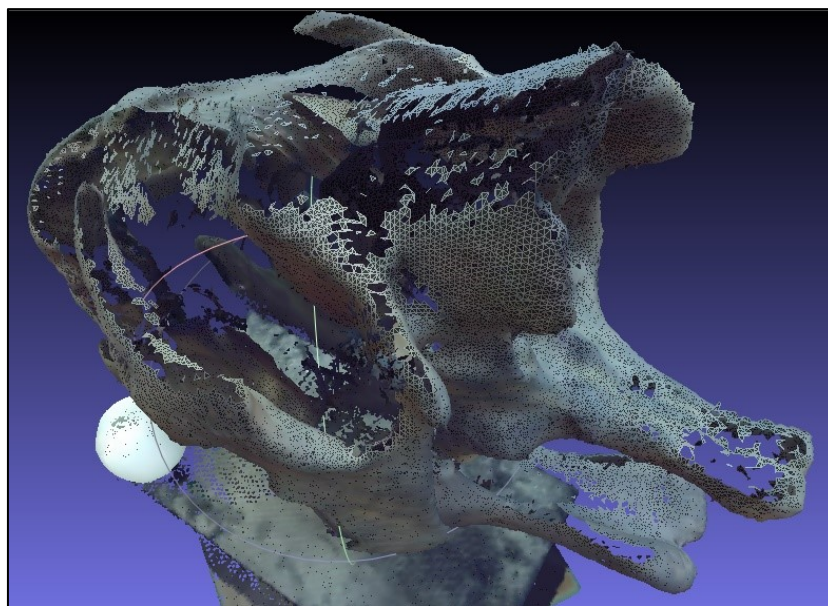


Obr. č. 27: Algoritmus Ball Pivoting (Bernardini a kol., 1999)

a) ideální případ, vznikne uzavřený model

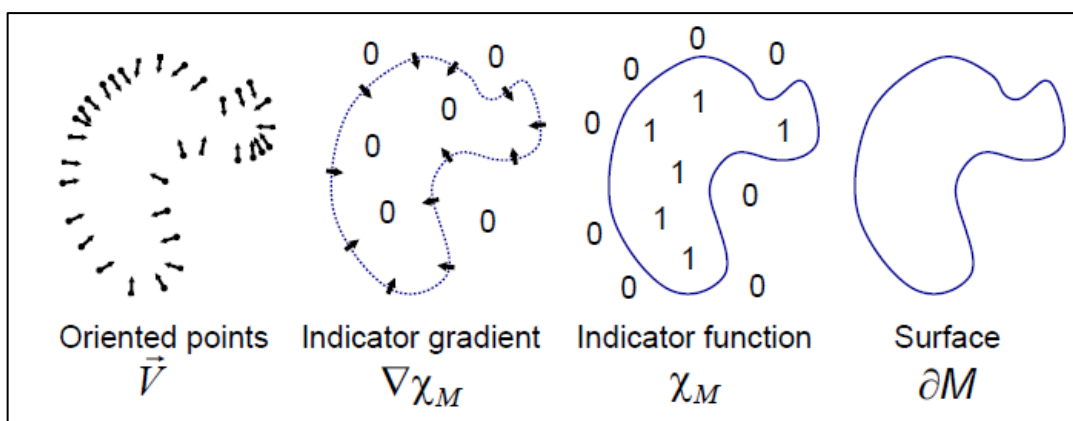
b) body jsou příliš vzdáleny od sebe, vznikne model obsahující díry

c) body vynechané z algoritmu, vznikne nepřesný model

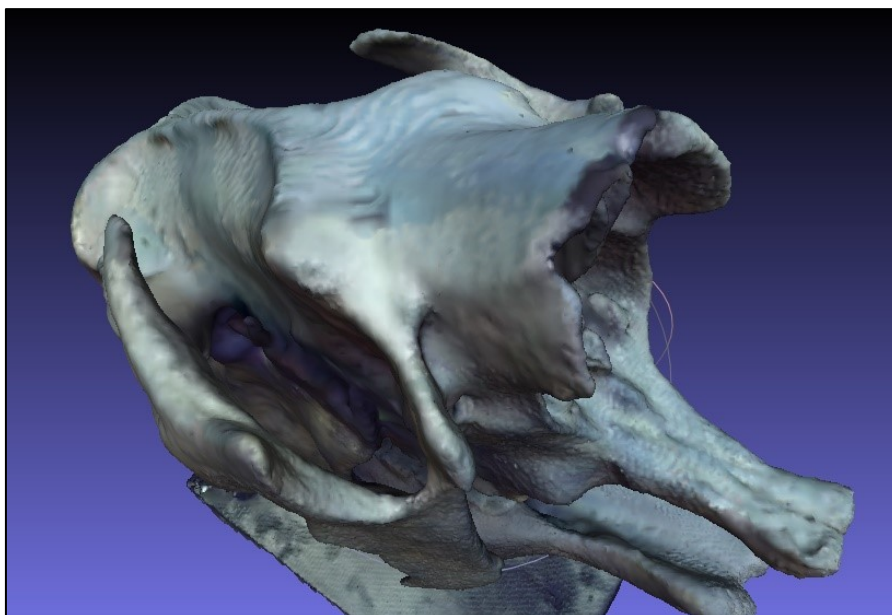


obr. č. 28: Model vytvořený algoritmem Ball Pivoting

Druhým nabízeným algoritmem je **Poissonova rekonstrukce**. Tento algoritmus pracuje s celým bodovým mračnem najednou, díky tomu do výsledného modelu nezasahují body vzniklé šumem. Algoritmus provádí čtyři hlavní kroky (viz obr. č. 29). V prvním kroku vypočte normály každému bodu. V druhé části je určen gradient indikátorové funkce, který má tu vlastnost, že je všude nulový s výjimkou bodů blízko povrchu, kde se rovná vypočteným normálám. Poté je z těchto gradientů vytvořena indikátorová funkce. V posledním kroku je vytvořen povrch modelu (Kazhdan, Bolitho, Hoppe, 2006). Model vytvořen Poissonovo rekonstrukcí je zobrazen na obrázku č. 30.



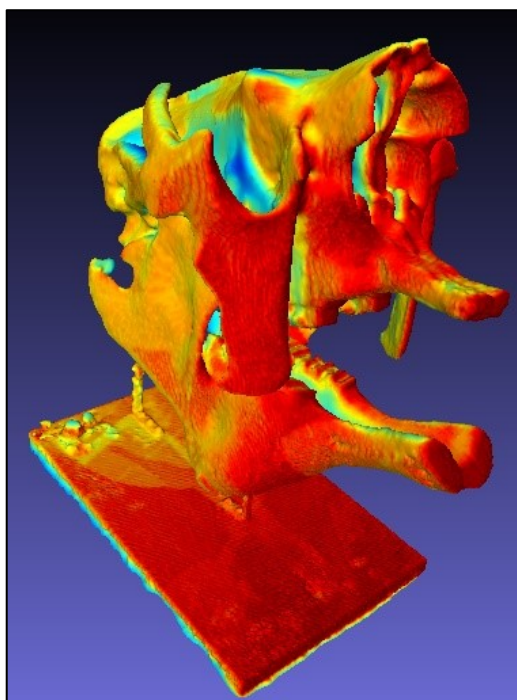
Obr. č. 29: Algoritmus Poissonovy rekonstrukce (Kazhdan, Bolitho, Hoppe, 2006)
zleva: výpočet normál, určení gradientu, vytvoření indikátorové funkce, vytvoření povrchu modelu



Obr. č. 30: Model vytvořený Poissonovo rekonstrukcí

Již na první pohled je zřejmé, že pro zkoumaný objekt lebky je lepší zvolit druhý algoritmus, tedy Poissonovu rekonstrukci. Důležitým atributem tohoto algoritmu je nastavení hloubky rekonstrukce. Pokud je nastavena malá hloubka je výsledný model hodně zaoblený a může postrádat detaily, v případě příliš velké hloubky je vytvořeno mnoho ostrých hran. Na obrázku č. 30 byla hodnota hloubky 8. Ve výsledném modelu byla zvolena vyšší hodnota 12. Výsledný model musí být ještě ořezán, aby zobrazoval pouze lebku s podstavcem. Nehodící části jako stůl, na kterém byl model položen, mohou být odmazány ručně. Pro výběr a následné odmazání malých objektů, které vznikly po vykreslení trojúhelníkové sítě, lze použít funkci *Small component selection*. Funkcí *Select vertex with edges longer than* budou vybrány trojúhelníky s delší stranou, než bylo zvoleno. Tyto trojúhelníky vznikly z použití Poissonovy rekonstrukce z důvodu uzavření sítě, aby nevznikly v povrchu žádné díry.

Na obrázku č. 31 lze vidět kvalitu vytvořeného modelu. Pro zobrazení byla použita funkce *Quality Mapper*. Modrá barva znázorňuje méně kvalitní části, naopak červené jsou velmi kvalitní. Lze si všimnout, že dobře přístupné oblasti na lebce jsou vykresleny žlutě až červeně. Části modelu, které se nachází více zakryté, nebo uvnitř lebky jsou vykresleny zeleně až modře.



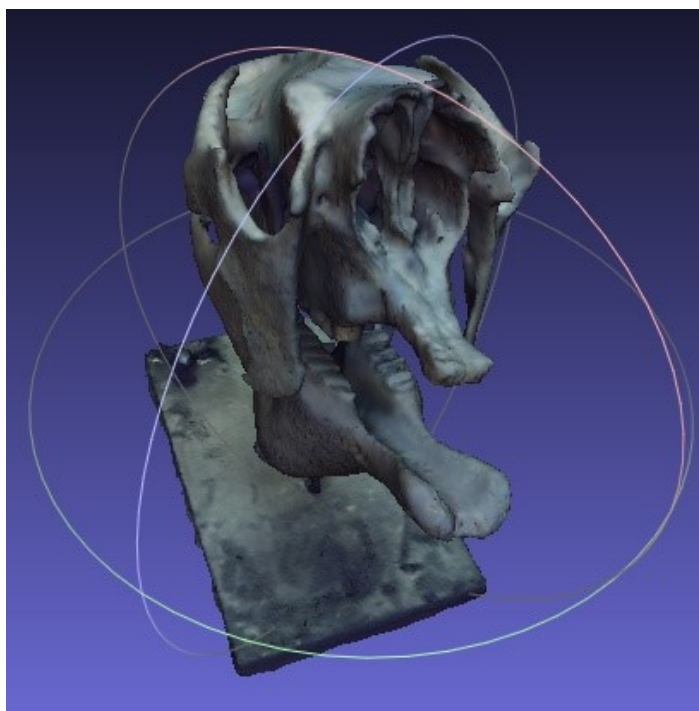
Obr. č. 31: *Quality Mapper* pro vytvořený model

4.2.5 Vytvoření textury

Posledním krokem před exportováním modelu ve formátu OBJ je vytvoření textury. Vytvořený model obsahuje barevnou informaci, ale formát OBJ vyžaduje vytvoření textury, která bude přes soubor MTL propojena s modelem. Soubor MTL zajišťuje správné načtení textury k objektu. Vytvoření textury bylo provedeno také v programu MeshLab.

Prvním krokem je parametrizace textury. V případě mého modelu byla využita funkce *Parametrization: Trivial Per-Triangle*. Tato funkce parametrizuje texturu podle trojúhelníků. Velikost textury byla nastavena na 4096 px. Ostatním parametrům byla zadána nulová hodnota. Pro vytváření trojúhelníků byla zvolena metoda Basic, takže vytvořené trojúhelníky budou všechny stejně velké.

Pro obarvení parametrizovaných trojúhelníků se použije známá barevná informace z bodového mračka. K přenesení barvy z bodového mračka na texturu slouží funkce *Transfer: Vertex Color to Texture*. V parametrech byla nastavena velikost 4096 px, tedy totožná s velikostí parametrizovaného souboru. Vytvořený model i s texturou je zobrazen na obrázku č. 32.



Obr. č. 32: Model s vlastní texturou

Vytvořený model tvořilo 486 282 vrcholů a 972 161 trojúhelníků. Po snížení velikosti beze ztráty kvality vznikl výsledný model s 99 618 vrcholy a s 199 108 trojúhelníky. Redukce byla provedena automaticky v programu Autodesk ReMake. MeshLab nabízí několik možností, jak exportovat vytvořený model. V mém případě byl zvolen formát OBJ. Další možné formáty jsou například: STL, PLY, 3DS a další.

4.3 Tvorba modelu ze snímků

Druhou metodou použitou k vytvoření modelu byla průseková fotogrammetrie. Níže jsou popsány všechny kroky provedené v programu Agisoft PhotoScan. Mezi ně patří seřazení snímků a autokalibrace, vytvoření bodového mračka a nakonec vytvoření textury. Měřítko bylo nastaveno v programu Autodesk ReMake.

4.3.1 Uspořádání snímků

Prvním krokem při vytváření nového projektu v programu Agisoft Photoscan je vytvoření tzv. *Chunk*, do kterého se nahrají všechny pořízené snímky. V mém případě se jednalo o 173 snímků ve formátu JPEG. Model a textura jsou vytvořeny ze všech aktivních snímků nahraných v *Chunk*.

První fází zpracování snímků je jejich uspořádání. K tomuto účelu slouží funkce *Align Photos*. Parametr přesnosti byl nastaven na *High*, další možnosti nastavení jsou *Lowest*, *Low*, *Medium*, *High*, *Highest*. Porovnání vytvořených modelů při použití přesnosti *Low* a *High* je zobrazeno na obrázku č. 33.



Obr. č. 33: Porovnání vytvořených modelů
(vlevo přesnost Low, vpravo přesnost High)

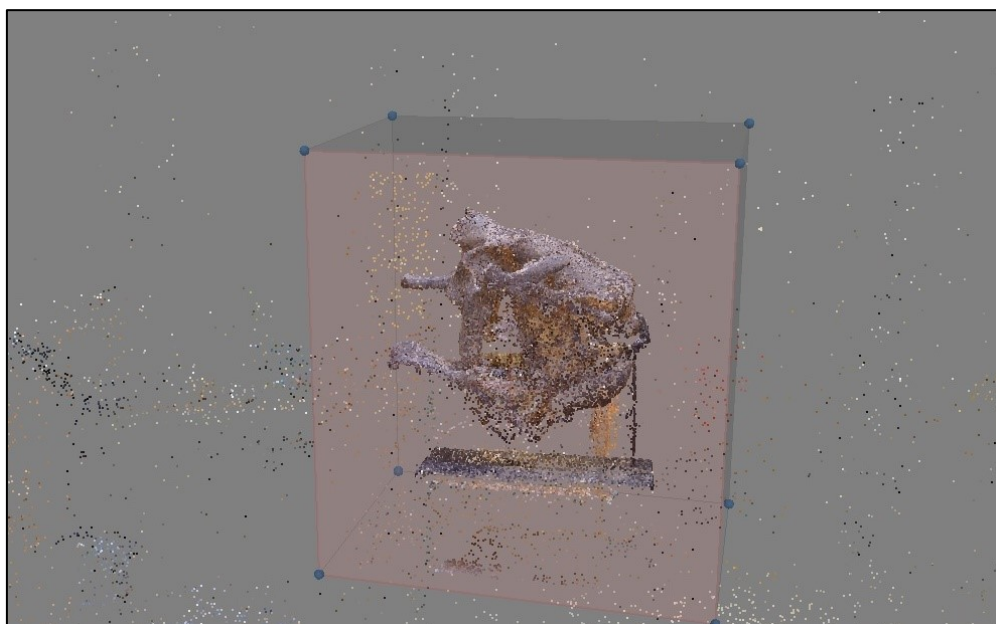
Dalším atributem je způsob, jakým budou nalezeny překrývající se páry snímků. Pokud je známa pozice kamery před zpracováním, použije se možnost *Reference preselection*. V mém případě, kdy není pozice kamery známa, se použije *Generic preselection*. Při použití této metody dojde nejdříve k nalezení překrývajících snímků za použití nižší přesnosti. V pokročilém nastavení se určuje horní hranice počtu bodů nalezených na jednom snímku, které mají být brány v úvahu při dalším zpracování. V mém případě byla nastavena hodnota 40 000. Druhým atributem v pokročilém nastavení je horní hranice počtu shodných bodů pro každý snímek. V mém případě byla nastavena hodnota 4 000.

Důležitým procesem, který probíhá během uspořádání snímků, je autokalibrace kamery (viz obr. č. 34).

f:	<input type="text" value="3950.7"/>		
cx:	<input type="text" value="0"/>	b1:	<input type="text" value="-2.11464"/>
cy:	<input type="text" value="0"/>	b2:	<input type="text" value="0.104939"/>
k1:	<input type="text" value="-0.0426034"/>	p1:	<input type="text" value="-9.50969e-05"/>
k2:	<input type="text" value="0.018098"/>	p2:	<input type="text" value="-0.00177442"/>
k3:	<input type="text" value="0"/>	p3:	<input type="text" value="0"/>
k4:	<input type="text" value="0"/>	p4:	<input type="text" value="0"/>

Obr. č. 34: Autokalibrace kamery

Výsledné řídké bodové mračno obsahuje 88 039 bodů. Kromě samotné lebky obsahuje bodové mračno i okolí scény. Před dalšími procesy je nutné bodové mračno oříznout pomocí funkce *Set Bounding Box* (viz obr. č. 35).



Obr. č. 35: Bodové mračno a použití funkce *Set Bounding Box*

4.3.2 Vytvoření modelu

Vytvořené bodové mračno obsahuje malý počet bodů na to, aby z něj mohl být vytvořen plnohodnotný model. Musí být vytvořeno husté mračno bodů. Pro tvorbu takového mračna slouží proces *Built Dense Cloud*. Jako v případě uspořádání snímků je i zde hlavním atributem kvalita zpracování. Zde je také na výběr z možností: *Lowest*, *Low*, *Medium*, *High* a *Ultra High*. V mém případě byla zvolena možnost *Medium*. Druhým atributem v pokročilém nastavení je určení hloubky filtrace. Použití filtru

redukuje špatně vzniklé body. Na výběr je z těchto filtrů: *Mild*, *Aggressive*, *Moderate* nebo *Disabled*. Filtr *Mild* slouží pro povrchy s velkým počtem detailů. Může být také užitečný v případě zpracování leteckých snímků, které obsahují špatně texturované povrchy střech. Filtr *Aggressive* se používá v případě, že objekt neobsahuje mnoho důležitých malých detailů. Filtr *Moderate* vytvoří bodové mračno, které je průměrem dvou předchozích filtrů. Poslední možností nastavení je *Disabled*. Při této možnosti nebude použit žádný filtr, to může vést ke vzniku velmi rušného bodového mračna. V mém případě byla použita možnost *Aggressive*.

Ze vzniklého hustého bodového mračna byly ručně odmazány body, které nepatří k modelu lebky. Výsledné bodové mračno (viz obr. č. 36) obsahuje 9 365 487 bodů.



Obr. č. 36: Husté bodové mračno

Dalším krokem je vytvoření trojúhelníkové sítě pomocí procesu *Build Mesh*. Prvním ze tří základních parametrů je nastavení typu povrchu. Na výběr je ze dvou možností: *Arbitrary* a *Height field*. Možnost *Arbitrary* slouží pro modelování jakýchkoliv objektů. Mělo by se jednat převážně o uzavřené předměty, jako jsou sochy nebo budovy. Možnost *Height field* je optimalizovaná pro modelování rovných předmětů,

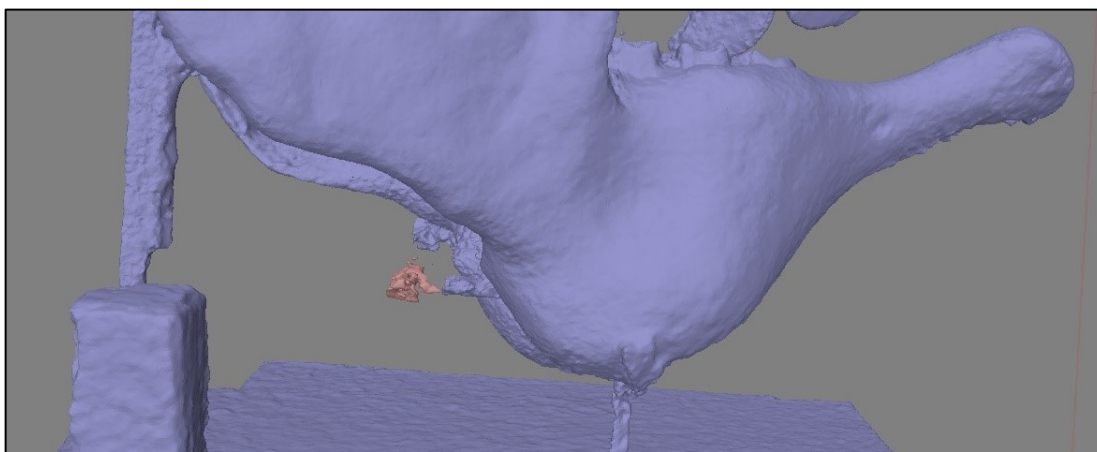
například při modelování zemského povrchu z dat pořízených pomocí letecké fotogrammetrie. V mém případě byla vybrána možnost *Arbitrary*.

Druhým parametrem je vybrání zdrojových dat. Lze vybrat mezi řídkým mračnem bodů, které vzniklo při uspořádání snímků, nebo může být vybráno husté bodové mračno, které vzniklo pomocí procesu *Build Dense Cloud*. V mém případě bylo vybráno husté bodové mračno.

Posledním základním parametrem je počet vytvořených trojúhelníků. Na výběr je ze čtyř možností *Low*, *Medium*, *High* a *Custom*. V případě prvních tří možností je počet vytvořených trojúhelníků předem určen. U čtvrté možnosti si může uživatel počet vytvořených trojúhelníků zvolit sám. V mém případě byla zvolena možnost *High*.

V pokročilém nastavení lze určit způsob interpolace. Neinterpolovaná data jsou sestrojena pouze z hustého bodového mračna a výsledný model může obsahovat díry. V mém případě byla interpolace aktivní, při této možnosti je vznik děr omezen. Při použití možnosti *Extrapolated* vznikne kompletně uzavřený model, ale dojde také ke vzniku nadbytečných ploch.

Vytvořený model obsahoval několik oddělených částí. K výběru těchto částí lze použít funkci *Gradual Selection*. Po výběru následuje odmazání (viz obr. č. 37).



Obr. č. 37: Odmazání částí nespojených s modelem

Model vytvořený ze snímků bez dalších úprav tvoří 933 935 vrcholů a 1 865 452 trojúhelníků. Stejně jako v případě modelu vytvořeného z dat laserového skenování byl celkový počet vrcholů a trojúhelníků snížen, tak aby klesla i datová velikost souboru. Redukce byla opět provedena automaticky v Autodesk ReMake. Výsledný model obsahuje 99 584 a vrcholů 198 891 trojúhelníků.

Posledním krokem provedeným v Agisoft PhotoScan bylo vytvoření textury. Pro vytvoření textury slouží proces *Build Texture*. Tento proces obsahuje tři základní volitelné parametry.

Prvním parametrem je režim mapování textur, který určuje zabalení textury do texturového atlasu. Tento parametr nabízí šest různých atributů: *Generic*, *Adaptive orthophoto*, *Orthophoto*, *Spherical*, *Single photo* a *Keep uv*. První možnost *Generic* byla využita při vytváření textury k mému modelu. Tato možnost slouží pro vytvoření k modelu s libovolnou geometrií. Možnost *Adaptive Orthophoto* rozděluje povrch objektu na plochou část a vertikální regiony. Plochá část je texturována pomocí ortografické projekce a vertikální regiony jsou texturovány samostatně. Tato možnost je vhodná pro stěny budov. Při použití možnosti *Orthophoto* je celá textura vytvářena pomocí ortografické projekce. Možnost *Spherical* je vhodné použít při vytváření textury pro model kulovitého tvaru. *Single photo* generuje texturu pouze z jednoho snímku. Poslední možnost *Keep uv* generuje texturu ze stávajícího předběžného obarvení modelu.

Dalším parametrem je způsob, jakým dojde ke kombinaci hodnot jednotlivých pixelů ve výsledné textuře. Na výběr je celkem z pěti způsobů: *Mosaic*, *Avarage*, *Max intensity*, *Min intensity* a *Disabled*. V mém případě byla použita možnost *Mosaic*. Tato metoda se skládá ze dvou kroků. První slouží k odstranění problému se spojením textury. Jedná se o nízkofrekvenční komponent, který je vypočítán váženým průměrem. V druhém kroku je z nejvhodnějšího jednoho snímku použit vysokofrekvenční komponent, který zodpovídá za detaily. Možnost *Avarage* používá k tvorbě textury vážený průměr všech hodnot pixelů na jednom snímku. *Max intensity* vybere snímek s maximální intenzitou příslušného pixelu. *Min intensity* je opakem předchozí možnosti, zde dochází k výběru snímku s minimální intenzitou příslušného pixelu. Při použití možnosti *Disabled* jsou vybrány snímky, které zobrazují zájmovou oblast v dobrém rozlišení a pohled kamery je téměř podél normály k rekonstruovanému povrchu v tomto bodě.

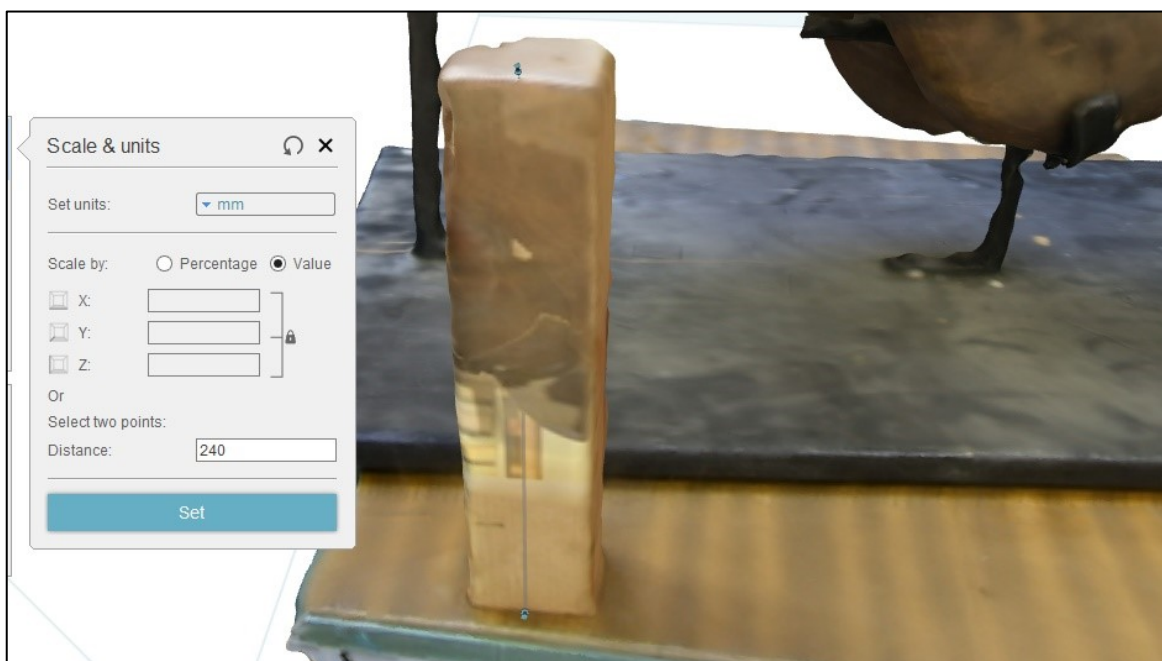
Třetím základním parametrem je velikost výsledné textury v pixelech. V mém případě byla zvolena velikost 4096 x 4096 px. Výsledný model je zobrazen na obrázku č. 38.



Obr. č. 38: Výsledný model vytvořený ze snímků

4.3.3 Nastavení měřítka

Aby výsledný model odpovídal skutečnosti, je nutné nastavit měřítko. Měřítko bude nastaveno pomocí přenesení známé vzdálenosti do digitálního modelu. V mém případě byla přesně změřena vzdálenost pomocného objektu, který byl umístěn ve scéně. Konkrétně se jednalo o dřevěný kvádr, jehož výška byla 240 mm. Stejný objekt byl vybrán i v digitálním modelu (viz obr. č. 39) a po zadání naměřené vzdálenosti se celý model zvětšil v příslušném poměru.



Obr. č. 39: Nastavení měřítka modelu

4.4 Hodnocení přesnosti

Důležitým krokem po vytvoření obou modelů je jejich porovnání mezi sebou a se skutečným modelem umístěným v muzeu. Pro značnou členitost povrchu lebky bylo zvoleno porovnání na základě vzdáleností naměřených na jednotlivých modelech. Skutečné hodnoty byly měřeny pásmem s přesností na milimetry. Vybrané hodnoty jsou zobrazeny v tabulce č. 2.

Oblast	Vzdálenost ve skutečnosti (mm)	Vzdálenost model Laser (mm)	Vzdálenost model snímky (mm)
Dlouhá strana podstavy	694	690	695
Krátká strana podstavy	398	395	395
Levá řada zubů	200	198	202
Dolní část nosu	165	168	168

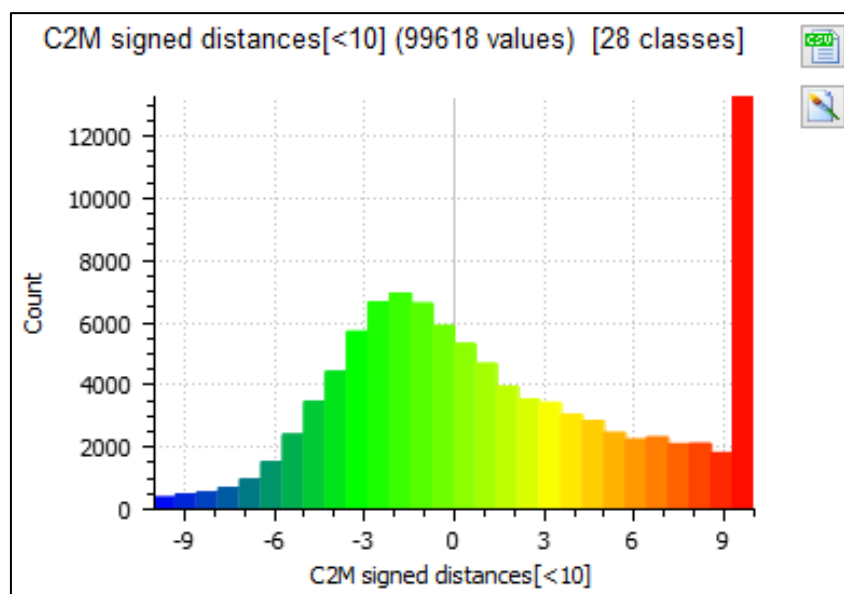
Tab. č. 2: Zaměřené délky

Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky ve dvojici je:

$$\sigma_{di} = \sqrt{\frac{[d_i d_i]}{n}}$$

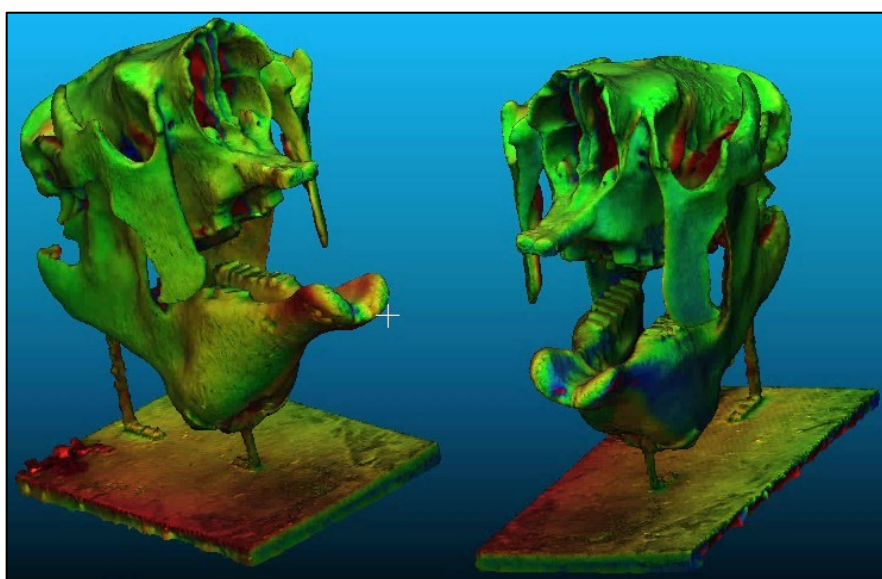
Kde d_i je rozdíl obou měření ve dvojici a n je počet dvojic. V mém případě je n rovno 4. U modelu vytvořeného pomocí laserového skenování se $d_1 = 4$ mm, $d_2 = 3$ mm, $d_3 = 2$ mm a $d_4 = -3$ mm. V případě modelu vytvořeného ze snímků se $d_1 = -1$ mm, $d_2 = 3$ mm, $d_3 = -2$ mm a $d_4 = -3$ mm. Po dosazení do vzorce je směrodatná odchylka pro model vytvořený pomocí laserového skenování rovna **3,1 mm** a pro model vytvořený ze snímků je rovna **2,4 mm**. Z výsledků směrodatných odchylek lze říci, že model vzniklý ze snímků více odpovídá skutečnému modelu.

Dále také bylo provedeno porovnání obou modelů v programu CloudCompare. Zde jako první krok proběhlo spojení obou modelů pomocí ručně vybraných spojovacích bodů. Spojovací body by měly být snadno identifikovány na obou modelech. Poté byla použita funkce *Compute cloud/mesh distance*, která zjistí rozdíly mezi oběma modely. Rozdílná vzdálenost byla počítána do maximální vzdálenosti 10 mm. Výsledkem byl obarvený model podle vzniklého histogramu (viz obr. č. 40).



Obr. č. 40: Histogram rozdílných hodnot

Z výše vytvořeného histogramu je patrné, že většina hodnot je v intervalu -3 až 0 mm. Velké množství hodnot s rozdílem 10 mm je způsoben tím, že modely nemají totožné pozadí. Model vytvořený ze snímků obsahuje část stolu společně s dalším objektem, naopak model vytvořený z dat laserového skenování obsahuje zbytky po ořezání spojovacích koulí. Obarvený model vytvořený z dat laserového skenování je zobrazen na obrázku č. 41. Modrá barva ukazuje plochu, kde jsou záporné rozdíly oproti modelu vytvořeného ze snímků. Červená plocha ukazuje, kde jsou kladné rozdíly. Červenou barvou je převážně obarvena podstava a objekty, jež nejsou na druhém modelu.



Obr. č. 41: Rozdíly mezi vytvořenými modely
(zobrazeno na modelu z dat laserového skenování)

5 Vizualizace v prostředí Internetu

Dílčím úkolem práce bylo prezentování výsledků v prostředí Internetu. K tomuto účelu byla napsána pomocí HTML jednoduchá stránka. Důležitým atributem v HTML kódu stránky, je příkaz, který volá dvě doplňující JavaScript knihovny. První je knihovna jsc3d.js. Tato knihovna umožňuje otevírat OBJ soubor i s texturou do nadefinované oblasti (canvas). Dále jsou z této knihovny volány příkazy pro vykreslování modelu. Jednotlivé způsoby vykreslování a výběr zobrazeného modelu lze na stránce zvolit pomocí tlačítek. Model může být vykreslen pomocí bodů, trojúhelníků, plochého povrchu, hladkého plochého povrchu nebo potažený texturou.

Důležité je do HTML vložit i volání knihovny jsc3d.touch.js. Pomocí této knihovny je umožněna rotace, přibližování a oddalování zobrazeného objektu.

Pro správné načtení stránky je důležité, aby všechny knihovny, modely a textury byly nahrány v jedné složce. Zdrojový kód HTML stránky je zobrazen v příloze č. 3 a v příloze č. 4 je zobrazen náhled vytvořené webové stránky.

6 Diskuze

Po vytvoření digitálního 3D modelu pomocí každé metody lze přistoupit k jejich vzájemnému porovnání. Důležitými aspekty při porovnání jednotlivých metod bude jejich náročnost sběru dat, obtížnost zpracování, použité softwary a výsledný vzhled vytvořeného modelu. Při výběru vhodné metody může mít na rozhodování velký vliv i cena jednotlivých metod, ale tento aspekt při hodnocení nebude brán v potaz.

Příprava scény je pro obě metody velmi podobná, ale v případě pořizování snímků by pro lepší výsledek bylo dobré snímat model v prostředí s heterogenním pozadím, jako je například zelené plátno. Výhodou pořizování snímků je nízká časová náročnost sběru dat. Nevýhodou využití snímků je špatný nebo nedostačující zisk informací ze špatně osvětlených míst na snímku. V mém případě se jednalo o vnitřní části lebky. Zde se ukazují výhody laserového paprsku a laserový skener je schopný tyto části velmi dobře zachytit. Nevýhodou metody laserového skenování je časová náročnost sběru dat při skenování v nejvyšším rozlišení. Během vlastního skenování byly zvoleny střední hodnoty pro rozlišení, ale pro vytvoření velmi přesného modelu by bylo vhodné zvolit hodnoty nejvyšší. Vyšší rozlišení, kromě značného nárůstu času

potřebného pro sběr dat, zvyšuje také datovou velikost. Pokud je tedy výstupem velmi husté bodové mračno o velké datové velikosti, zvýší se i požadavky na hardware a software při zpracování.

Tím se dostávám k samotnému zpracování získaných dat. Rychlost zpracování závisí na hardwarovém vybavení používaného počítače. V mém případě byly pro zpracování použity dva odlišné stroje, výkonný stolní počítač ve škole a průměrný domácí notebook. První kroky zpracování dat z vlastního laserového skenování musely být provedeny právě na školním počítači, protože registraci těchto dat je možné provést pouze v softwaru Trimble RealWorks. To značně omezuje zpracování dat. Další nevýhodou bylo, že celá práce nemohla být provedena pouze v jednom softwaru. To byla naopak silná výhoda při zpracování snímků, kdy mohl být celý model vytvořen pouze v jednom softwaru. Celková náročnost byla vyšší v případě laserového skenování z důvodu provádění ruční registrace dat a výběru vhodné metody pro vytvoření trojúhelníkové sítě modelu, naopak zpracování dat ze snímků bylo z velké části automatické a nejdůležitější částí bylo zvolení správných parametrů jednotlivých funkcí.

Při tvorbě digitálního 3D modelu je velmi důležité správné zvolení použitých softwarů. Výše zmíněný software Trimble RealWork představuje program, který nabízí vhodné řešení registrace dat z laserového skenování a analýzy vytvořeného bodového mračna, ale není vhodný pro tvorbu 3D modelu. Model byl z registrovaných dat vytvořen v softwaru MeshLab. Tento program je nejlepší volbou pro tvorbu digitálního 3D modelu, protože nabízí mnoho algoritmů pro úpravu, či tvorbu trojúhelníkové sítě nebo textury. Používání těchto dvou softwarů zároveň se jeví jako velmi dobrá volba. Jedinou nevýhodou je, že Trimble RealWorks dokáže pracovat s mnohem větším bodovým mračnem, než dokáže MeshLab zpracovat. Při tvorbě modelu ze snímků vždy stačilo použít pouze jeden software. Použitý program Agisoft PhotoScan je velmi profesionální software pro zpracování snímků a vytvoření 3D modelu. Jedinou nevýhodou je hardwarová náročnost a při zpracování v nejvyšší kvalitě nastává problém s časovou náročností jednotlivých kroků. Alternativou může být software Autodesk ReMake, který zpracuje snímky plně automaticky až do výsledného 3D modelu, je tedy důležité správné pořízení kvalitních snímků. Velkou výhodou tohoto programu je tvorba modelu přes cloud, díky čemuž neklade tak vysoké nároky

na hardware počítače. Nevýhodou může být plně automatická tvorba modelu, kdy uživatel nemůže měnit různé parametry jako v případě Agisoft PhotoScan.

Oba vytvořené modely dobře zachycují podobu skutečného modelu lebky (viz příloha č. 1 a č. 2). Model vytvořený z dat laserového skenování lépe zachycuje vnitřní prostory lebky. Naopak model vytvořený z hustšího bodového mračka, které bylo získáno ze snímků, velmi dobře zachycuje vnější strukturu modelu a je obalen reálnější texturou.

Z výše získaných poznatků je pro výběr vhodné metody důležitý tvar objektu a scéna, ve které je objekt umístěn. Pokud se jedná o objekt se složitou vnitřní strukturou, která na snímcích zaniká, je lepší využít metodu laserového skenování i za cenu výrazně delšího sběru dat. Pro rychlou tvorbu modelů, u kterých je důležitá pouze vnější struktura například sochy, či fasády domů a scéna okolí objektu je dobře nasvícena, je vhodné použití průsekové fotogrammetrie.

7 Závěr

Hlavním cílem této práce bylo vytvoření digitálního 3D modelu za použití metody laserového skenování a průsekové fotogrammetrie. Snímaný objekt byl zapůjčen z Chlupáčova muzea historie Země a jednalo se o model lebky vyhynulého živočicha *Megatherium*. Dílčími cíli byly představení principů jednotlivých metod, pořízení vhodných dat (laserová data, snímky) daného objektu pro tvorbu 3D modelu, zpracování dat, tvorba 3D modelu a jeho vizualizace, hodnocení přesnosti výsledných 3D modelů a prezentace výsledků na internetu.

V teoretické části je seznámení s principy metody laserového skenování a průsekové fotogrammetrie s použitím odborné literatury. V praktické části práce byl popsán sběr vlastních dat za použití obou výše zmíněných geoinformačních metod. Pro zdařilý sběr dat byla důležitá správná příprava scény. Největší prostor je v praktické části věnován zpracování získaných dat a následné tvorbě 3D modelů. Důležitým výstupem této práce je také HTML stránka, která díky JavaScriptovým knihovnám umožňuje vizualizaci vytvořených 3D modelů.

Při hodnocení přesnosti modelů bylo zjištěno, že se vytvořené modely příliš neliší. Obě použité metody zachycují zkoumaný objekt velmi přesně a umožňují tvorbu

modelů odpovídajících skutečnosti. Výběr metody tedy závisí hlavně na dostupnosti jednotlivých přístrojů a softwarovém vybavení uživatele.

V případě zájmu by mohly být vytvořené modely a HTML stránka použity Chlupáčovo muzeem pro vizualizaci lebky na vlastních webových stránkách. Modely by také mohly být použity jako předloha pro 3D tisk.

8 Literatura a zdroje

AGISOFT LLC (2016): Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2 [online]. [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_en.pdf

AUTODESK (2016): Autodesk ReMake Getting Started Guide [online]. [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: https://remake.autodesk.com/assets/Autodesk_ReMake_Guide_01.pdf

BALTSAVIAS, E. P. (1999): A comparison between photogrammetry and laser scanning. ISPRS Journal of photogrammetry and Remote Sensing, roč. 54, č. 2, s. 83–94.

BARBER, D. M., DALLAS, R. W. A., MILLS, J. P. (2006): Laser Scanning for Architectural Conservation. Journal of Architectural Conservation, roč. 12, č. 1, s. 35–52.

BARGO, M. S. (2001): The ground sloth *Megatherium americanum*: skull shape, bite forces, and diet. Acta Palaeontologica Polonica, roč. 46, č. 2, s. 173–192.

BERNARDINI, F. a kol. (1999): The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, roč. 5, č. 4, s. 349–359.

BÍLÁ, L. (2012): Stereofotogrammetrie [online – prezentace]. ČVUT, Praha. Laboratoře fotogrammetrie. Fakulta stavební, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/fm10/ftg1-cv3_stereoskopie_teorie.pdf

BÍLÁ, Z., ŠEDINA, J. (2014): Porovnání metod dokumentace historických artefaktů [online]. ČVUT, Praha. Fakulta stavební, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://lfgm.fsv.cvut.cz/telc/2014/texty/Bila_Sedina.pdf

BÖHM, J. (2002): Fotogrammetrie [online]. Vydavatelství VŠB – TUO, Ostrava, [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <http://igdm.vsb.cz/igdm/materialy/Fotogrammetrie.pdf>

CIGNONI, P. a kol. (2008): MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool. Eurographics Italian Chapter Conference, s. 129–136.

ČVUT: Fotogrammetrie [online]. Laboratoře fotogrammetrie. Fakulta stavební, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <http://lfgm.fsv.cvut.cz/data/vvt/s1/laserteorie3d.pdf>

DE IULIIS, G., PUJOS, F., TITO, G. (2009): Systematic and taxonomic revision of the Pleistocene ground sloth *Megatherium* (*Pseudomegatherium*) *tarijense* (*Xenarthra*: *Megatheriidae*). *Journal of Vertebrate Paleontology*, roč. 29, č. 4, s. 1244–1251.

DOBROVOLNÝ, P. (2006): Stereofotogrammetrie [online]. Studijní materiál, MUNI, Brno, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1431/jaro2006/Z8101/um/Fotogrammetrie_7.pdf

HALIČKOVÁ, J., CHLEPKOVÁ, M., KOSKA, B. (2007): Posúdenie presnosti metódy laserového skenovania a digitálnej fotogrametrie pri dokumentácii historickej fasády [online]. ČVUT, Praha. Fakulta stavební. Katedra speciální geodézie, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~koska/publikace/soubory/2007_presnost_skenovani.pdf

- HODAČ, J. (2002). Sběr a zpracování geometrických dat. In: Návrh koncepce prostorového informačního systému památkového objektu [online], Disertační práce, ČVUT, Praha, 2002, s. 35–61, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: lfgm.fsv.cvut.cz/~hodac/disertace/4_kapitola.pdf
- KAZHDAN, M., BOLITHO, M., HOPPE, H. (2006): Poisson Surface Reconstruction [online]. Eurographics Symposium on Geometry Processing, [cit. 2017-07-13]. Dostupné z: <http://hhoppe.com/poissonrecon.pdf>
- KEMP, K. K. (2008): Encyclopedia of geographic information science. Los Angeles: SAGE Publications. 558 s.
- KOSKA, B., KŘEMEN, T., POSPÍŠIL, J. (2009): Dokumentace architektonických památek s využitím laserového skenování [online]. ČVUT, Praha. Fakulta stavební. Katedra speciální geodézie, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://k154.fsv.cvut.cz/~koska/publikace/soubory/2009_45_GID_koska.pdf
- KRAAK, M. J., ORMELING, F. (2010): Cartography: visualization of geospatial data. Pearson Education Limited, London, 248 s.
- KRAUS, K. (2007): Photogrammetry: geometry from images and laser scans. Walter de Gruyter, Berlin, 459 s.
- LASERSCANNING EUROPE (2017): Trimble TX5 Scanner [online]. [cit. 2017-07-15]. Dostupné z: <http://www.laserscanning-europe.com/en/glossary/trimble-tx5-scanner>
- LERMA, J. L., et al. (2010): Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3D archaeological documentation: the upper Paleolithic Cave of Parpalló as a case study. Journal of Archaeological Science 37, č. 3, s. 499–507.
- LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S., HARLEY, I. (2006): Close Range Photogrammetry. Whittles Publishing, Dunbeath, 300 s.
- MILLS, J., ANDREWS, D. (2011): 3D Laser Scanning for Heritage: Advice and guidance to users on laser scanning in archaeology and architecture [online]. English Heritage, [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: https://content.historicengland.org.uk/images-books/publications/3d-laser-scanning-heritage2/3D_Laser_Scanning_final_low-res.pdf/
- PAVELKA, K. (2003): Fotogrammetrie 10. Vydavatelství ČVUT, Praha, 194 s
- SNAVELY, K., N. (2008): Scene Reconstruction and Visualization from Internet Photo Collections [online]. Disertační práce. UW, Washington. Computer Science & Engineering, [cit. 2017-06-22]. Dostupné z: <https://www.cs.cornell.edu/~snave/publications/thesis/thesis.pdf>
- SOCHOR, V. (1990): Lasery a koherentní svazky. Academia, Praha, 194 s.
- STANĚK, J. (2013): Kapitoly z fotogrammetrie [online]. SPŠ zeměměřická, Praha, [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://spszem.cz/storage/files/68/Kapitoly-z-FOT-2013.pdf>

STRAPEK, M. (2016): Modelování výroby za pomoci metody 3D Laserscanningu [online]. Diplomová práce. ZČU, Plzeň. Fakulta strojní. KPV, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: https://otik.uk.zcu.cz/xmlui/bitstream/handle/11025/25211/Diplomova%20prace_Strapek.PDF?sequence=1&isAllowed=y

ŠIMÍČEK, M. (2014): Implementace metody structure from motion do UAV fotogrammetrie [online]. Diplomová práce. UP, Olomouc. Přírodovědecká fakulta. Katedra geoinformatiky, [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: http://theses.cz/id/xve1ij/Simicek_DP_2014.pdf

TRIMBLE (2003): User Guide Trimble TX5 Laser Scanner [online]. Trimble Navigation Limited, Sunnyvale, USA, verze 2.0, 126 s., [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: <https://data2.manualslib.com/pdf4/97/9630/962969-trimble/tx5.pdf?5638b85bd473d6b4222e7dcd62d3508c>

TRIMBLE (2016): Trimble RealWorks Software Version 10.2 Release Notes [online]. Trimble Inc., Westminster, USA, [cit. 2017-07-14]. Dostupné z: http://www.kmcgeo.com/Datasheets/Trimble_RealWorks_10.2_RELEASE-NOTES_ENG_20161011.pdf

VAN GENECHTEN, B. (2008): Theory and practice on Terrestrial Laser Scanning: Training material based on practical applications [online]. 3DRiskMapping, [cit. 2017-06-22] Dostupné z: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/201130/2/>

VÚGTK (2017): Terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí [online]. Online aplikace, ČÚZK. Dostupné z: <https://www.vugtk.cz/slovník/>

WIKIPEDIA (2007): Megatherium [online]. [cit. 2017-07-18]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Megatherium>

WESTOBY, M. J., BRASINGTON, J., GLASSER, N. F., HAMBREY, M. J., REYNOLDS, J. M. (2012): 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, č. 179, s. 300–314.

Seznam příloh

- Příloha 1: Pohled na modely z levé strany
- Příloha 2: Pohled na modely zepředu
- Příloha 3: HTML kód vytvořené stránky
- Příloha 4: Ukázka vytvořené stránky
- Příloha 5: DVD-R - snímky, data z laserového skeneru, projekt v Agisoft PhotoScan, projekt v Trimble RealWorks, exportované bodové mračno, vytvořené modely, HTML kód stránky

*Příloha 1: Pohled na modely z levé strany
vlevo model vytvořený z dat laserového skenování
uprostřed fotografie skutečného modelu
vpravo model vytvořený z fotografií*



*Příloha 2: Pohled na modely zepředu
vlevo model vytvořený z dat laserového skenování
uprostřed fotografie skutečného modelu
vpravo model vytvořený z fotografií*



Příloha 3: HTML kód vytvořené stránky

```
<html>
<head>
<title>3D Model - PrF UK - Celonk Marek - 2017</title>
<meta http-equiv="Content-Type" content="text/html; charset=utf-8" />
<script type="text/javascript" src="jsc3d.js"></script>
<script type="text/javascript" src="jsc3d.touch.js"></script>
<script>
function Button1(myValue) {
viewer.setParameter('SceneUrl','projekt.obj');
viewer.setParameter('InitRotationZ', 0);
viewer.setParameter('InitRotationY', 150);
viewer.setParameter('InitRotationX', 0);
viewer.setParameter('ModelColor', '#ff0000');
viewer.setParameter('BackgroundColor1', '#aaaaaa');
viewer.setParameter('BackgroundColor2', '#0101DF');
switch (myValue) {
case 1:
viewer.setParameter('RenderMode','texture');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Laser - texture";
break;
case 2:
viewer.setParameter('RenderMode','point');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Laser - point";
break;
case 3:
viewer.setParameter('RenderMode','smooth');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Laser - smooth";
break;
case 4:
viewer.setParameter('RenderMode','flat');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Laser - flat";
break;
case 5:
viewer.setParameter('RenderMode','wireframe');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Laser - wireframe";
break;
}
}
```

```

viewer.init();
viewer.update();
}
function Button10(myValue) {
viewer.setParameter('SceneUrl','fotky.obj');
viewer.setParameter('InitRotationZ', 0);
viewer.setParameter('InitRotationY', 0);
viewer.setParameter('InitRotationX', 270);
viewer.setParameter('ModelColor', '#ff0000');
viewer.setParameter('BackgroundColor1', '#aaaaaa');
viewer.setParameter('BackgroundColor2', '#0101DF');
switch (myValue) {
case 1:
viewer.setParameter('RenderMode','texture');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Photos - texture";
break;
case 2:
viewer.setParameter('RenderMode','point');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Photos - point";
break;
case 3:
viewer.setParameter('RenderMode','smooth');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Photos - smooth";
break;
case 4:
viewer.setParameter('RenderMode','flat');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Photos - flat";
break;
case 5:
viewer.setParameter('RenderMode','wireframe');
document.getElementById("infoLine").innerHTML="Photos - wireframe";
break;
}
viewer.init();
viewer.update();
}
</script>
<style>

```

```

body {background: darkblue;}
body,td,th {font-family: Calibri;}
td {text-align:center;
padding:5px 5px 5px 5px;}
footer {text-align:center;
color:grey;
font-size:20px;
padding:62px 24px;}
.text {text-align:center;
color:white;
font-size:25px;
text-shadow:0px 1px 0px black;}
.button {
width:150px;
box-shadow:inset 0px 1px 0px 0px black;
background:linear-gradient(to bottom, silver 5%, gray 100%);
border-radius:8px;
border:1px solid white;
display:inline-block;
cursor:pointer;
color:white;
font-family:Calibri;
font-size:15px;
font-weight:bold;
padding:3px 10px;
text-decoration:none;
text-shadow:0px 1px 0px black;
}
.button:hover {
background:linear-gradient(to bottom, blue 5%, navy 100%);
}
.button:active {
position:relative;
top: 1px;
}
</style>
</head>
<body onload="Button1(1)">

```

```

<table align="center" border=0 width=1200>
<tr>
<td class="text">Laser:</td>
<td><button class="button" onclick="Button1(1)">Texture</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button1(2)">Points</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button1(3)">Smooth</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button1(4)">Flat</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button1(5)">Wireframe</button></td>
</tr>
<tr>
<td class="text">Photos:</td>
<td><button class="button" onclick="Button10(1)">Texture</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button10(2)">Points</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button10(3)">Smooth</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button10(4)">Flat</button></td>
<td><button class="button" onclick="Button10(5)">Wireframe</button></td>
</tr>
</table>
<div align="center">
<canvas id="cv" width=1200 height=600>
Použijte jiný prohlížeč :-(
</canvas>
<script type="text/javascript">
var viewer = new JSC3D.Viewer(document.getElementById('cv'));
</script>
</div>
<div class="text" id="info" ></div>
<footer>
Marek Čelonk, PŘF UK, 2017
</footer>
</body>
</html>

```



